

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**UNIDAD DE POSGRADO**

**Estimación del índice de sequía a partir de datos  
imágenes NDVI y LST del sensor MODIS y TRMM  
para las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca  
– Perú, durante el periodo 2000 – 2013**

**TESIS**

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con  
mención en Geofísica

**AUTOR**

**Gisell Indira CARBAJAL DOMINGUEZ**

**ASESORES**

**Bram LEO WILLEMS**

**Waldo Sven LAVADO CASIMIRO**

**Lima – Perú**

**2017**

## Dedicatoria

*A Dios, mi madre y mi padre Esther y Celedonio y mis hermanos Jonathan, Ángela y*

*Lucia, y a mis sobrinas Johana y Kira.*

*Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica,  
como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

## **AGRADECIMIENTO**

Al Dr. Bram Leo Willems asesor y gestor del presente trabajo por su orientación y enseñanza en todo momento.

Al Dr. Joel Rojas Acuña y al Dr. Leonidas Ocola Aquire por sus enseñanzas y sugerencias en la elaboración de la tesis.

Al SENAMHI en especial al Dr. Waldo Lavado Casimiro por su orientación y haberme proporcionado los datos in-situ requerido para la evaluación de mis resultados.

A los integrantes del Laboratorio de Teledetección (LABTEL) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) por el apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

Al proyecto Cátedra CONCYTEC: “Teledetección en Desertificación y Sequía” (R.P.Nº 328-2011-P) por la subvención de una beca para el estudio de maestría y desarrollo de la tesis.

Al proyecto PEER: “Strengthening resilience of Andean river basin headwaters facing Global change”, por el financiamiento del trabajo de campo realizado en Piura y la participación en diversos eventos ya sea en forma oral o poster.

## RESUMEN

La sequía constituye un fenómeno complejo producto del desequilibrio del sistema hídrico, con repercusiones en la agricultura, ecología y en el ámbito socioeconómico. A fin de lograr un mayor entendimiento acerca de los factores que inciden en el inicio, duración e intensidad de éste fenómeno, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los índices de sequía generados mediante las imágenes satelitales para el seguimiento de la distribución espacial y evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS), definido como la primera componente principal del índice de condición de la vegetación (ICV), índice de condición de la temperatura (ICT) e índice de condición de la precipitación (ICP). Es decir, el ISS integra tres productos; los dos primeros productos obtenidos del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite Terra; como son: el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el LST (Land Surface Temperature) y el tercer producto la precipitación estimada por el sensor activo radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM 3B43 versión 7 (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). El ISS sintetiza la información acerca del déficit de precipitación, estrés térmico del suelo y el estado de crecimiento de la vegetación en el proceso de sequía.

En el presente trabajo se muestra los resultados de la distribución espacial y evolución temporal del ISS, ICV, ICT e ICP, para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca, donde los valores menores a 0.4 corresponden a la sequía extrema, severa y moderada, y también muestra que los años 2004 y 2005 fueron años de sequía. Los índices ISS, ICV, ICT e ICP se evaluaron con el índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses (IPE3) lo cual refleja adecuadamente la información de la sequía meteorológica para cada zona de aridez. En la zona árida corresponden el ISS y el ICV, en la zona semiárida corresponden el ISS y el ICT y en la zona subhúmeda seca corresponden el ISS y el ICT, donde el ISS tiene una moderada correlación de 0.66 en la zona semiárida y de 0.54 en la zona subhúmeda seca, para las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca en el periodo marzo 2000 a diciembre 2013.

**Palabras claves:** sequía, ISS, ICV, ICT, ICP, NDVI, LST, MODIS y TRMM.

## ABSTRACT

Drought is a complex phenomenon caused by the breaking of water balance, which always causes an impact on agricultural, ecological and socio-economic spheres. In order to achieve a better understanding about the factors that affect the beginning, duration and intensity of this phenomenon, the goal of this thesis is to analyze the drought indices using satellite images to monitor the spatial distribution and temporal evolution of the synthesized drought index (SDI). The SDI is defined as the principal component of the vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI) and precipitation condition index (PCI). This means that the ISS integrates three products; the first two products, obtained from the sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) on board of the satellite Terra, are the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and the LST (Land Surface Temperature), and the third product is the precipitation estimated by the active sensor radar of precipitation (PR), on board the satellite TRMM 3B43 version 7 (Tropical Rainfall Measuring Mission). The ISS synthesizes precipitation deficits, soil thermal stress and vegetation growth status in drought process.

The results of this thesis shows the results of the spatial distribution and temporal evolution of the SDI, VCI, TCI and PCI, for the arid, semi-arid and dry sub-humid zone, where values less than 0.4 correspond to extreme, severe and moderate drought. It also shows that the years 2004 and 2005 were years of drought. The SDI, VCI, TCI and PCI indices were evaluated with the standardized precipitation index at a 3-month scale (IPE3), which adequately reflects the meteorological drought information for each aridity zone. In the arid zone corresponds the SDI and the VCI, in the semi-arid zone corresponds the SDI and the TCI and in the dry sub-humid zone corresponds the SDI and the TCI. Finally, the ISS has a moderate correlation of 0.66 in the semi-arid zone and 0.54 in the dry sub-humid zone, for the regions of Piura, Lambayeque and Cajamarca in the period March 2000 to December 2013.

**Keywords:** drought, ISS, ICV, ICT, ICP, NDVI, LST, MODIS y TRMM

## ACRÓNIMOS

<b>ACP</b>	Análisis de Componentes Principales
<b>AMS</b>	American Meteorological Society
<b>ANA</b>	Autoridad Nacional del Agua
<b>AVHRR</b>	<i>Advanced very-high-resolution radiometer</i>
<b>BIL</b>	Band Interleaved By Line
<b>BIP</b>	Band Interleaved By Pixel
<b>BSQ</b>	Band Sequential
<b>CLD</b>	Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por Sequía grave o Desertificación, en particular en África.
<b>CONCYTEC</b>	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica
<b>ENOS</b>	El Niño Oscilación Sur
<b>ENVI</b>	Environment for Visualizing Images
<b>ETo</b>	Evapotranspiración
<b>ETP</b>	Evapotranspiración Potencial
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>GLOVIS</b>	Global Visualization
<b>GPCC</b>	<i>Global Precipitation Climatology Centre</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>ICP</b>	Índice de Condición de Precipitación
<b>ICT</b>	Índice de Condición de Temperatura
<b>ICV</b>	Índice de Condición de Vegetación
<b>IDL</b>	Interactive Data Language
<b>INRENA</b>	Instituto Nacional de Recursos Naturales
<b>IOS</b>	Índice de Oscilación Sur
<b>IPE</b>	Índice de Precipitación Estandarizado
<b>ISS</b>	Índice de Sequia Sintetizado
<b>JAXA</b>	Japan Aerospace Exploration Agency
<b>LABTEL</b>	Laboratorio de Teledetección
<b>LGP</b>	Length of Growing Period

<b>LST</b>	Land Surface Temperature
<b>MINAM</b>	Ministerio Del Ambiente
<b>MODIS</b>	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
<b>MRTWEB</b>	MODIS Reprojection Tool Web Interface
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>OMM</b>	Organización Meteorológica Mundial
<b>ONURRD</b>	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
<b>Pa</b>	Precipitación anual
<b>PCA</b>	Principal Component Analysis
<b>PCI</b>	Precipitation Condition Index
<b>PDSI</b>	Palmer Drought Severity Index
<b>PNUMA</b>	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
<b>PR</b>	Precipitation Radar
<b>RAE</b>	Real Academia Española
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>SDI</b>	Synthesized Drought Index
<b>SENAMHI</b>	Servicio Nacional de meteorología e Hidrología
<b>SPI</b>	Standardized Precipitation Index
<b>TCI</b>	Temperature Condition Index
<b>TERRA</b>	Es un satélite multinacional de la NASA
<b>TMI</b>	TRMM Microwave Imager
<b>TRMM</b>	Tropical Rainfall Measuring Mission
<b>TS</b>	TimeStats
<b>TSM</b>	Temperatura de Superficie del Mar
<b>TSS</b>	Temperatura Superficial del Suelo
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>VCi</b>	Vegetation Condition Index
<b>VIRS</b>	Visible and Infrared Scanner
<b>VIS</b>	Visible

<b>WGS84</b>	World Geodetic System 84
<b>UNCCD</b>	United Nations Convention to combat desertification
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator



## ÍNDICE

RESUMEN..	iv
ABSTRACT.....	v
ACRÓNIMOS.....	vi
ÍNDICE.....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
 <b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	 <b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema .....	4
1.3. Objetivos de la tesis .....	6
1.3.1. Objetivo general .....	6
1.3.2. Objetivos específicos .....	6
1.4. Relación con otras investigaciones .....	7
1.5. Organización de la tesis .....	7
 <b>CAPÍTULO 2: LA SEQUÍA .....</b>	 <b>8</b>
2.1. Definición de sequía .....	10
2.2. Clasificación de la sequía .....	11
2.3. Tierras secas .....	12
2.3.1 Evapotranspiración .....	13
2.3.2 Precipitación .....	14
2.3.3 Índice de aridez .....	14
 <b>CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	 <b>20</b>
3.1. Índices de sequía .....	20
3.1.1 Índice de condición de vegetación (ICV) .....	20
3.1.2 Índice de condición de temperatura (ICT) .....	23
3.1.3 Índice de condición de precipitación (ICP) .....	25
3.1.4 Índice de precipitación estandarizado (IPE) .....	25
3.1.5 Índice de sequía sintetizado (ISS) usando el análisis de componentes principales (ACP) .....	30
3.2. Ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico .....	34
3.2.1 El coeficiente de correlación lineal .....	34
 <b>CAPÍTULO 4: ÁREA DE ESTUDIO, DATOS UTILIZADOS Y SOFTWARE .....</b>	 <b>36</b>
4.1. Áreas de estudio .....	36
4.1.1. Clima .....	37
4.1.2. Geomorfología .....	39
4.2. Datos utilizados .....	41

4.2.1.	NDVI – MODIS – TERRA .....	41
4.2.2.	TSS – MODIS – TERRA .....	42
4.2.3.	Precipitación – radar de precipitación (PR) – TRMM .....	43
4.2.4.	Datos in-situ .....	44
4.2.4.1.	Datos de precipitación mensual .....	44
4.3.	Software .....	54
4.3.1.	Módulo TIMESTATS V1.0 .....	54
4.3.1.1.	Módulo “Input/output file options” .....	54
4.3.1.2.	Módulo “Data cleaning” .....	55
<b>CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS .....</b>		<b>57</b>
5.1.	Metodología .....	57
5.2.	Procesamiento de los productos .....	57
5.2.1.	Preparación de los productos .....	59
5.2.1.1.	Módulo TIMESTATS V1.0 .....	60
5.2.2.	Normalización y análisis de componentes principales .....	61
5.2.2.1.	Máximo valor y mínimo valor de las imágenes .....	62
5.2.2.2.	Cálculo de los indicadores de sequía .....	62
5.2.2.3.	Análisis de componentes principales .....	63
5.3.	Evaluación del índice de sequía sintetizado con el índice de precipitación estandarizado .....	65
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS .....</b>		<b>66</b>
6.1.	Distribución espacial y evolución temporal de los índices de sequía de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca .....	67
6.1.1.	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la vegetación ICV .....	67
6.1.2.	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la temperatura ICT .....	69
6.1.3.	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la precipitación ICP .....	71
6.1.4.	Distribución espacial y evolución temporal de los índice de sequía sintetizado ISS .....	74
6.2.	Serie de tiempo del primer componente principal CP1 de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca.....	76
6.3.	Serie de tiempo de los índices para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca.....	76
6.4.	Serie de tiempo de las áreas de sequía extrema del índice de sequía sintetizado (ISS) .....	81
6.5.	Análisis de correlación de la precipitación in-situ y la precipitación TRMM.....	83
6.6.	Evaluación de los índices de sequía con el índice de precipitación estandarizado (IPE) .....	85
6.6.1.	Análisis de correlación de Pearson de los índices de sequía y el índice de precipitación estandarizado IPE para las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca .....	86

<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES .....</b>	<b>92</b>
6.1 Conclusiones.. .....	92
6.2 Recomendación .....	93
REFERENCIAS .....	94
<b>ANEXO A.....</b>	<b>103</b>
A.1 Terminología del PCA .....	103
Referencias anexo A .....	104
<b>ANEXO B .....</b>	<b>105</b>
B.1 Plataforma Satelitales y Sensores Pasivos y Activos.....	105
Referencias anexo B .....	116
<b>ANEXO C.....</b>	<b>117</b>
C.1 Productos NDVI y TSS del MODIS – TERRA y precipitación del TRMM. ....	117
<b>ANEXO D.....</b>	<b>128</b>
D.1 Tratamiento a los datos del precipitación del SENAMHI. ....	128

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b>	Valores de algunas variables que se asuman constantes en el cálculo de la evapotranspiración referencial. (MINAM, 2012).	14
<b>Tabla 2.2.</b>	Índice de aridez y total de tierras secas del Perú (2010). La superficie base utilizada es del mapa del desierto y desertificación del Perú, elaborado por INRENA (2006). (MINAM, 2012).	17
<b>Tabla 2.3.</b>	Ecosistemas característicos en los Desiertos y Áreas de Desertificación en el Perú. (MINAM, 2011).	18
<b>Tabla 2.4.</b>	Clasificación de las Zonas Áridas según la CLD (MINAM, 2011).	19
<b>Tabla 3.1</b>	Descripción de las escalas de tiempo del IPE (McKee et al., 1993).	29
<b>Tabla 3.2</b>	Esquema de Clasificación ICV, ICT, ICP, IPE y ISS (Du et al., 2013).	29
<b>Tabla 4.1.</b>	Estaciones Meteorológicas del SENAMHI para los departamentos de Piura, Lambayeque y Cajamarca del 1970-2013 (Elaboración propia).	45
<b>Tabla 6.1.</b>	Áreas perdidas y afectadas por sequía campaña agrícola 2003/2004 (PRPAD-Región Piura-2005).	74
<b>Tabla 6.2.</b>	Presenta las áreas de sequía extrema del ISS en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca para el periodo del 2000 - 2013 en la región de Lambayeque, Piura y Cajamarca.	81
<b>Tabla A.1.</b>	Una guía parcial a la terminología sinónimo asociado con ACP. (Lindsay, 2002)	103
<b>Tabla B.1.</b>	Características del Satélite TERRA (Abrams y Hook, 1998).	106
<b>Tabla B.2.</b>	Identificación de los productos (Mas F. J., 2011).	107
<b>Tabla B.3.</b>	Especificaciones generales del sensor MODIS (Fuente <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php">http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php</a> , 20/08/2014).	109

<b>Tabla B.4.</b>	Características de las primeras 19 bandas espectrales del sensor MODIS (Fuente <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php">http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php</a> , 20/08/2014)	110
<b>Tabla B.5.</b>	Características de las siguientes 17 bandas espectrales del sensor MODIS (Fuente <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php">http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php</a> , 20/08/2014)	111
<b>Tabla B.6.</b>	Características del TRMM 3B43. (GES DISC, 2015)	113
<b>Tabla C.1.</b>	Productos NDVI – MODIS – TERRA (febrero 2000 a diciembre 2013).	118
<b>Tabla C.2.</b>	Productos LST – MODIS – TERRA (marzo 2000 a diciembre 2013).	120
<b>Tabla C.3.</b>	Imágenes de precipitación del TRMM-3B43 (enero 2000 a diciembre 2013).	126
<b>Tabla D.1.</b>	Tabla de la correlación lineal de las estaciones meteorológica con las imágenes del TRMM del 2000 al 2013.	128

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b>	Distribución de tierras secas en el mundo. (FAO, 2008).	15
<b>Figura 2.2.</b>	Mapa de tierras secas del Perú, 2010. (MINAM, 2011).	16
<b>Figura 3.1</b>	Se muestra el ángulo cenit del Sol $\theta_s$ , ángulo de visión $\theta_v$ , ángulo acimut relativo $\varphi_s - \varphi_v = \Delta\phi$ y la normal de la superficie $\vec{n}$ (Rahman y Dedieu, 1994).	20
<b>Figura 3.2</b>	Vector de píxeles en el análisis de componentes principales (adaptado de Gonzales y Woods (2002)).	30
<b>Figura 3.3</b>	Geometría de análisis de componentes principales y bandas PCA (Graig y Jie, 2002).	32
<b>Figura 4.1.</b>	a) El área de estudio representado en amarillo (Piura, Lambayeque y Cajamarca). b) El modelo de elevación digital de la zona norte del Perú. (Elaboración propia) ( <a href="http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/">http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/</a> ) Fecha de acceso 12/2015.	36
<b>Figura 4.2.</b>	Zonas de aridez del suelo. (MINAM 2011) (Elaboración propia).	37
<b>Figura 4.3.</b>	Ecorregiones (SIGMINAM 2011).	40
<b>Figura 4.4.</b>	MRTWEB ( <a href="http://mrtweb.cr.usgs.gov">http://mrtweb.cr.usgs.gov</a> ). Fecha de acceso 01/2014.	42
<b>Figura 4.5.</b>	Estaciones meteorológicas del área de estudio. Facilitados por el SENAMHI.	46
<b>Figura 4.6.</b>	Estaciones meteorológicas del área de estudio para cada zona de aridez. Facilitados por el SENAMHI (Elaboración propia).	46
<b>Figura 4.7.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona hiperárida de 1970 al 2013 (Elaboración propia).	47
<b>Figura 4.8.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la	48

zona árida de 1970 al 2013 (Elaboración propia).

<b>Figura 4.9.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona semiárida de 1970 al 2013 (Elaboración propia).	49
<b>Figura 4.10.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona subhúmeda seca de 1970 al 2013 (Elaboración propia).	50
<b>Figura 4.11.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona subhúmeda húmeda de 1970 al 1999 (Elaboración propia).	51
<b>Figura 4.12.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona subhúmeda húmeda de 2000 al 2013 (Elaboración propia).	52
<b>Figura 4.13.</b>	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona húmeda de 1970 al 2013 (Elaboración propia).	53
<b>Figura 4.14.</b>	Ventana del entorno de trabajo del TimeStats muestra los 6 módulos.	54
<b>Figura 4.15.</b>	Input/output file options ingresa el archivo en TIFF y los archivos de salida se guardan en la carpeta de trabajo.	55
<b>Figura 4.16.</b>	Procesando el NDVI – MODIS usando el TimeStats para la limpieza de los datos.	56
<b>Figura 5.1.</b>	Metodología (Adaptado de Du et al., 2013).	58
<b>Figura 5.2</b>	Apilado por mes la TSS, el NDVI y la precipitación/TRMM para el área de estudio (Elaboración propia).	61
<b>Figura 5.3.</b>	Ejemplo del máximo valor y mínimo valor de las imágenes (Elaboración propia).	62
<b>Figura 5.4.</b>	(a) La opción de análisis de componentes principales (b) Seleccionamos la imagen apilada de un mes que contiene ICV, ICT e ICP (Elaboración propia).	63

<b>Figura 5.5.</b>	Ventana de entorno de trabajo del analisis de componentes principales. Los diversos campos se llenan y se designa donde guardar la salida a las estadísticas y la imagen resultante como se muestra.	63
<b>Figura 5.6.</b>	(a) Procesamiento del analisis de componentes principales usando la estadística del ENVI 5.2. (b) Se obtiene el porcentaje de varianza explicada establecidos por cada componente de datos totales y se escoge el numero de bandas que se desea resumir la información en nuestro caso solo usamos la primera que es la que tiene mas del 75% luego dar OK.	64
<b>Figura 6.1.</b>	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la vegetación (ICV) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	68
<b>Figura 6.2.</b>	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la temperatura (ICT) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	70
<b>Figura 6.3.</b>	Serie histórica de producción agrícola para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca. ( <a href="http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult">http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult</a> ) (Fecha de acceso 15/07/2016).	72
<b>Figura 6.4.</b>	Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la precipitación (ICP) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	73
<b>Figura 6.5.</b>	Distribución espacial y evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	75
<b>Figura 6.6.</b>	Serie de tiempo de la variancia del primer componente principal (ACP1) contiene información más del 75 % en toda la serie a partir de ICV, ICT e ICP y se define como un nuevo índice de sequía, es decir, el índice de sequía sintetizado (ISS).	76
<b>Figura 6.7.</b>	Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona árida de la región de Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	78
<b>Figura 6.8.</b>	Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona semiárida de la región de Piura,	79



región Lambayeque y región Cajamarca.

<b>Figura 6.9.</b>	Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona subhúmeda seca de la región de Piura, Lambayeque y Cajamarca.	80
<b>Figura 6.10.</b>	Serie de las áreas de sequía extrema del ISS en la zona árida, semiárida y subhúmeda seca para el periodo del 2000 - 2013 de la región Lambayeque, región Piura y región Cajamarca.	82
<b>Figura 6.11.</b>	El diagrama de dispersión y la serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas (morado) y serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual del TRMM (azul), para las zonas hiperárida y árida de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	83
<b>Figura 6.12.</b>	El diagrama de dispersión y la serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas (morado) y serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual del TRMM (azul), para las zonas semiárida, subhúmeda seca, subhúmeda húmeda y húmeda de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.	84
<b>Figura 6.13.</b>	Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona árida.	87
<b>Figura 6.14.</b>	Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona semiárida.	88
<b>Figura 6.15.</b>	Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona Subhúmeda seca.	89
<b>Figura 6.16.</b>	El coeficiente de correlación entre los índices de sequía y el IPE en diferentes escalas de tiempo para las 6 zonas de índices de aridez. Los valores de R más altos indican en la zona árida y semiárida. Donde el nivel de significancia (p) es mayor a 0,05, excepto para los datos con asterisco (*).	90
<b>Figura B.1.</b>	Organización de los productos Modland en tiles (Mas F.J,	107

2011).

<b>Figura B.2.</b>	Angulo de visión del sensor MODIS (Mass F. J., 2011)	111
<b>Figura B.3.</b>	En la presente tesis se ha seleccionado TRMM 3B43 precipitación mensual acumulada ( <a href="https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/2000/3B43_BR.20000101.7A.PNG">https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/2000/3B43_BR.20000101.7A.PNG</a> ) Fecha de acceso 10/01/2015.	114
<b>Figura B.4.</b>	Esta es una representación de la órbita del TRMM, se muestra el swath del radar de precipitación como una delgada cinta blanca con puntos de colores, los colores representan la intensidad de la lluvia (Amita Mehta, 2015).	114
<b>Figura B.5.</b>	Geometría de escaneo actual del radar de precipitación (PR), sensor para escáner de radiación visible e infrarrojo (VIRS), sensor de microondas pasivo (TMI), sensor de imágenes de relámpago (LIS) y un sistema de energía radiante de la superficie terrestre que emplea una base de datos de imágenes de nube de altísima resolución (Ramos, 2013).	115

### INTRODUCCIÓN

La sequía tiene siempre un impacto en los ámbitos agrícolas, ecológicos y socio-económicos y provoca consecuencias ambientales, sociales y económicas graves en todo el mundo; estudios recientes muestran que la sequía puede provocar una reducción en la producción primaria neta (NPP por sus siglas en inglés) a nivel mundial (Zhao y Running, 2010).

En el Perú, de los 1729 distritos analizados para el (PLANGRACC *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*) a nivel nacional, 1301 distritos tienen riesgo en sequías (con diferentes niveles de riesgo), lo que representa el 75.25 % del total; en el escenario agrícola, los departamentos con riesgo alto son: Lambayeque, Tacna e Ica, con riesgo medio son: Ancash, Apurímac, Arequipa, Ayacucho, Cajamarca, Huancavelica, Junín, La Libertad, Moquegua, Piura, Puno y Tumbes; y en el escenario pecuario, con riesgo alto por sequía se localiza en los departamentos de Cusco, Huancavelica, Huánuco, Ica, Lambayeque, Puno y Piura y los demás departamentos tienen un nivel medio a excepción del departamento de Amazonas que tiene un riesgo bajo y los departamentos de Loreto y Madre de Dios que no tienen este riesgo (INDECI, 2014).

En el presente trabajo, el ISS (Índice de Sequía Sintetizado) integra varios datos tales como el NDVI, LST y precipitación del TRMM. El ISS es el componente principal del ICV, ICT e ICP; y son validados con el IPE, (Índice de Precipitación Estandarizado) obtenido de los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas, para precisar un análisis fundamental que permita realizar un planeamiento estratégico para prevenir un evento de sequía en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca.

## 1.1 Antecedentes

El LABTEL en el 2009 propuso un modelo de inicio de sequía en la Costa Norte del Perú, uso la serie de tiempo de los promedios mensuales de las imágenes NDVI - AVHRR - NOAA, los índices El Niño Oscilación Sur (ENOS), y la técnica de regresión lineal múltiple. Obtuvo la serie de tiempo de los promedios mensuales de las anomalías estandarizadas de los índices NDVI y ENOS en el periodo de jul-81 a dic- 03. La evolución mensual del NDVI en el año 2000 en todo Perú muestra que los meses de sequía comienzan en agosto y terminan en diciembre. El NDVI promedio de todo Perú varía de 0.0 (suelo desnudo) a 0.7 (suelo vegetado). La desviación estándar del NDVI muestra que en la costa norte varía menos en comparación con la sierra y la selva. (Rojas et al., 2009).

El SENAMHI en el 2011, hizo un análisis regional de frecuencia de sequía usando L-Momentos, se ha mapeado las 4 regiones homogéneas de precipitación clasificadas por elevación y rango de tasa de precipitación y el periodo de retorno de una sequía teórica equivalente al 40% de precipitación normal o histórica, con lo que se concluye que en el área de estudio los episodios de sequías en la zona baja (áreas emplazadas de 0 a 1500 msnm) son más recurrentes y más severos con periodos de retorno en el orden de 2 a 10 años; en la zona media (áreas entre 1500 a 3000 msnm) se presenta con periodos de retorno de 15 a 25 años y en la zona alta (áreas sobre los 3000 msnm) su recurrencia es más distante, con periodos de retorno de 25 a 30 años. (Acuña J., 2011).

Du en el 2013, usó datos de teledetección para monitorear la sequía meteorológica y agrícola, en la provincia de Shandong, China 2010-2011. El índice de sequía sintetizado (ISS) simula el déficit de precipitación, el estrés térmico del suelo y el estado de crecimiento de la vegetación en el proceso de sequía y no sólo tiene una fuerte correlación con el índice de precipitaciones estandarizados de 3 meses (SPI3), sino también con el rendimiento de los cultivos y las áreas de cultivos afectadas por la sequía (Du et al., 2013).

Rivera el 2014 en Argentina, propuso mejorar el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica en base a la comparación

de diversos índices de sequía en múltiples escalas de tiempo y la elaboración de una climatología para el período 1961-2008. A partir de una regionalización que permitió identificar la posible influencia de los eventos El Niño/La Niña en las series de tiempo, con énfasis en la ocurrencia de sequías. Finalmente, analizó aplicaciones de interés para los sectores agrícola y de recursos hídricos y se evaluaron los cambios futuros en las características de las sequías en la región de estudio (Rivera J., 2014).

Anculle el 2016, realizó un modelo del inicio de la sequía en la costa norte de Perú a partir del NDVI de los sensores AVHRR, VEGETATION, MODIS y los datos ENOS (1982-2013), en la cual se ha determinado una alta correlación de 0.84 entre el valor anual máximo de NDVI-VEGETATION en Pomalca y la producción de caña de azúcar en Lambayeque en el periodo 1998-2012, además se corrobora la sequía en el año 2004. Se concluyó que el NDVI es un buen indicador de la sequía agrícola en la costa norte de Perú. Las series de tiempo de anomalías estandarizada de promedio espacial NDVI mensual y la serie de tiempo de anomalía estandarizada TSM en la región oceánica Niño 1 y 2, mostrando una correlación de 0.43 con un desfase de 1 mes. Empleando la técnica de regresión lineal múltiple se obtuvo una ecuación entre el NDVI, TSM, IOS y precipitación, el cual diseño un modelo de predicción de inicios de eventos de sequía (Anculle T, 2016).

A nivel mundial, existen estudios relevantes para desarrollo de diferentes índices de sequía, como parte de un esfuerzo por cuantificar dichos eventos (Heim, 2002; Yao, et al., 2011). Los índices de amplio uso se obtienen a partir de datos de las estaciones meteorológicas; el SPI (Standardized Precipitation Index) (McKee et al., 1993) y PDSI (Palmer Drought Severity Index) (Palmer, 1965). El SPI tiene varias características nuevas con respecto a los índices anteriores, incluyendo su simplicidad y flexibilidad temporal que permite que su aplicación para la vigilancia de la sequía sea en toda escala de tiempo (Guttman, 1999), lo que facilita su aceptación por parte de la comunidad científica y tomadores de decisiones (Hayes et al., 1999). Utilizaron el SPI para examinar la sequía grave en las llanuras del sur y en el suroeste de los Estados Unidos, y los resultados mostraron que el SPI es útil para detectar el inicio de la sequía y el seguimiento de su evolución, asimismo, el SPI ha sido empleado para vigilar la sequía meteorológica en África y otras regiones (Du et al., 2013).

Una de las desventajas del SPI es su obtención a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, lo que implica el empleo de técnicas de interpolación espacial, como el inverso de la distancia ponderada y el modelo Kriging ordinario, para el estudio espacial de la sequía (Brown et al., 2008; Du et al., 2013).

En comparación con los índices *in-situ*, los índices de sequía determinados a partir de los datos imágenes de satélite son más adecuados para la vigilancia de las condiciones de sequía espaciales (Du et al., 2013). A lo largo de los años y a través de casos estudios, han sido propuestos y validados varios índices de sequía, tales como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de condición de la vegetación (ICV) (Kogan, 1995b; Kogan y Sullivan, 1993 citados en Du et al., 2013). Asimismo, la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el índice de condición de temperatura (ICT) (Kogan, 1995; Unganai y Kogan, 1998), que son útiles para el control de la intensidad, la duración y el impacto de la sequía a nivel regional o global (Singh et al., 2003 citados en Du et al., 2013). El ICV ha demostrado ser de utilidad para la vigilancia de impacto de la sequía sobre la vegetación a gran escala, incluyendo la sequía agrícola y tiene una fuerte correlación con el rendimiento de los cultivos (Liu y Kogan, 1996; Unganai y Kogan, 1998; Kogan et al., 2005; Du et al., 2013). Un estudio realizado en una región semi-árida de la Península Ibérica también encontró que la interpretación del ICV era más complicada que otros índices de sequía, ya que proporciona una condición de la medida indirecta de la humedad (Vicente-Serrano, 2007).

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la región de Piura los impactos de la sequía han ocasionado pérdidas considerables, principalmente en las provincias de Morropón, Ayabaca y Huancabamba y en segundo orden en las provincias de la Costa como Piura, Sullana, Sechura, Paita y Talara durante los años 2003, 2004 y 2005, por lo que se presentó la pérdida de miles de hectáreas de cultivos instalados o dejadas de instalar; pérdida de hatos de ganado debido a la escasez de pastos y ha propiciado la migración del poblador rural a las ciudades urbano marginales, según reportes de la Dirección Regional de Agricultura entre Enero y Febrero del 2004 por efecto

de la sequía se han perdido 9 028 Ha de Cultivos instalados, valorizados en S/. 7 273 262.63. En el período octubre 2004 a febrero 2005, por efectos de heladas y sequía, se presentaron daños en los cultivos, pastos y ganadería, por un valor de S/. 46 305 725.75 (PRPAD-Región Piura-2005). Según la serie histórica de producción agrícola del MINAGRI, durante el año 2004 la región de Piura, fue afectada por la sequía, lo que ocasionó una reducción de las superficies cosechadas, por lo tanto, se vio influenciado en la producción del año indicado en todos los cultivos ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (Fecha de acceso 15/07/2016).

En la región Lambayeque durante el 2004 se presenta una baja producción de cultivo de caña de azúcar en Pomalca (Anculle, 2016). Según la serie histórica de producción agrícola del MINAGRI, en el año 2004 fue afectada por la sequía, lo que ocasionó una reducción de las superficies cosechadas, por lo tanto, se vio influenciado en la producción por la sequía en los años 2004 y 2005 en todos los cultivos ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (Fecha de acceso 15/07/2016).

La región de Cajamarca durante el 2004 fue afectada por la sequía, lo que ocasionó una reducción de las áreas cosechadas, por lo tanto, se vio influenciado la productividad del año indicado en todos los cultivos según la serie histórica de producción agrícola ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (Fecha de acceso 15/07/2016). Por lo que es necesario plantear una disyuntiva para analizar los índices de sequía a partir de los datos físicos y un método de análisis de componentes principales que permite vigilar el inicio, duración y final de la sequía, los que son validados para las zonas: Árida, semiárida y subhúmeda seca, de las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca – Perú durante el periodo 2000 - 2013.

Por ello, es necesario analizar mediante los datos de imágenes satelitales la distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la vegetación (ICV), índice de condición de la temperatura (ICT) e índice de condición de la precipitación (ICP) usando datos NDVI/MODIS, TSS/MODIS y precipitación/TRMM.

Siendo necesario generar el índice de sequía sintetizado (ISS) como indicador en la concurrencia de eventos de sequía en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca durante el periodo 2000 – 2013.

¿De qué manera la estimación del índice de sequía, generado mediante los datos de imágenes satelitales NDVI y TSS del sensor MODIS y precipitación del TRMM, identificará la sequía en la zona árida, semiárida y subhúmeda seca de las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca durante el periodo 2000 – 2013?

¿Cuál de los índices analizará mejor la distribución espacial y evolución temporal de la sequía, en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca?

¿Cómo el modelo estadístico de análisis de componentes principales sintetizará la información obtenida a partir del ICV, ICT e ICP?

¿Cuál de los índices ISS, ICV, ICT e ICP evalúa mejor la sequía usando la correlación lineal de Pearson?

### **1.3 Objetivos de la tesis**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Analizar los índices de sequía generados mediante las imágenes satelitales para las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar la distribución espacial y evolución temporal del ICV, ICT e ICP para los eventos de sequía en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca durante el periodo 2000 – 2013 usando imágenes NDVI/MODIS, LST/MODIS y precipitación/TRMM.
- Generar el ISS, como indicador en la concurrencia de eventos de sequía, mediante un modelo estadístico basado en el análisis de componentes principales generados a partir del ICV, ICT e ICP en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca durante el periodo 2000 – 2013.



- Evaluar ISS, ICV, ICT e ICP mediante una correlación lineal de Pearson con el IPE, como indicador para el estudio de eventos de sequía en las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca durante el periodo 2000 – 2013.

#### **1.4 Relación con otras investigaciones**

La presente investigación está enmarcada dentro los fines del Proyecto Cátedra CONCYTEC “*Teledetección en la Desertificación y Sequía*”, el cual está enfocado a investigar la problemática de la desertificación y sequía en el territorio peruano. Las investigaciones programadas por este proyecto sobre indicadores de la sequía contribuirán a la evaluación del Índice de Sequía Sintetizado como un indicador de las características temporales y espaciales del fenómeno climatológico de “*sequía*”.

#### **1.5 Organización de la tesis**

*En el Capítulo 2* se hace una revisión de la literatura de interés para la investigación. Se presenta la definición, clases de sequía e indicadores de sequía y el análisis de componentes principales, técnica estadística para integrar y reducir la dimensionalidad de los indicadores de sequía. *El Capítulo 3* se describe el área de estudio y sus características geográficas y también aborda los datos utilizados, sus características y las formas de adquisición. *El Capítulo 4* describe los métodos y procedimientos realizados en el procesamiento de los datos. *El Capítulo 5* se presenta los resultados del procesamiento de los productos del NDVI y TSS del sensor MODIS y de precipitación del TRMM, organizados en torno a los objetivos de la investigación. Finalmente *en el Capítulo 6* se presenta las conclusiones de la investigación, su contribución a la literatura actual, recomendaciones para las direcciones de una futura línea de investigación y se presenta los anexos.

### LA SEQUÍA

La sequía se percibe como uno de los desastres naturales más costosos y menos entendidos, dada la dificultad para definir su comienzo y fin, su lento desarrollo y las múltiples facetas que posee a nivel regional. Entre todos los eventos meteorológicos extremos, posee la mayor duración y la menor predictibilidad (Mishra y Singh, 2010).

Este fenómeno ocurre virtualmente en todas las zonas climáticas, tanto en regiones húmedas como secas y en cualquier época del año. Si bien no posee una definición universal, en términos generales puede decirse que es un período prolongado, usualmente de longitud estacional o mayor, durante el cual la precipitación se encuentra por debajo de sus valores normales. A la ausencia de una definición de sequía precisa y universalmente aceptada se suma la confusión acerca de si existen o no condiciones de sequía y si existen, su grado de severidad (Wilhite y Svoboda, 2000). Esta deficiencia natural en la precipitación resulta en escasez de agua para ciertas actividades, grupos o sectores ambientales (White y Walcott, 2009).

Usualmente se considera únicamente a la precipitación cuando se reconocen y analizan las condiciones de sequía, dado que es el factor principal que controla la formación y persistencia de condiciones de sequía (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

Las características y épocas de las precipitaciones, incluyendo la distribución de los días lluviosos durante las etapas fenológicas de crecimiento de los cultivos, la intensidad y duración de las precipitaciones, su inicio y fin juegan un papel significativo en la ocurrencia de sequías (Mishra y Singh, 2010). Por lo tanto, cada año de sequía es único en cuanto a sus características climáticas y sus impactos (Wilhite y Svoboda, 2000). No obstante, otras variables como la temperatura, el viento, la humedad del aire, la evapotranspiración, la cobertura nubosa y una mayor insolación pueden reforzar la escasez de agua, agravando la severidad de las sequías.

Los impactos de las sequías se evidencian a nivel ambiental, a través de la aceleración de los procesos de desertificación, generando incrementos en el riesgo de incendios, afectando los hábitats naturales, los ecosistemas y limitando la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico e industrial. Las sequías también afectan la calidad del agua, dado que fluctuaciones climáticas moderadas alteran los regímenes hidrológicos que poseen efectos sustanciales en la química de los reservorios (Webster *et al.*, 1996). También es posible evidenciar sus impactos a nivel socio-económico, a través de la generación de mermas en los rendimientos del sector agrícola-ganadero, afectando la producción de energía hidroeléctrica y ocasionando incluso pérdidas humanas. Los habitantes de regiones marginales, cercanas a cursos de agua contaminados, se ven afectados en épocas de sequía cuando la reducción de los caudales expone el material contaminante (Ferraro *et al.*, 2009). Como se indica, a diferencia de otras amenazas naturales como las inundaciones, los huracanes o los terremotos, los impactos de las sequías son no estructurales.

Además, sus impactos se extienden sobre regiones geográficas sumamente extensas en relación a las amenazas naturales antes mencionadas. En las últimas tres décadas se observó la ocurrencia de sequías de gran escala en todos los continentes (Dai, 2011). Históricamente, se considera que las sequías son la amenaza natural que más personas afecta en el mundo (Wilhite, 2000). En 1995, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias estimó para los Estados Unidos pérdidas económicas anuales de entre 6 y 8 mil millones de dólares asociadas a la ocurrencia de este fenómeno (Wilhite y Svoboda, 2000). La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONURRD, 2012) indica que durante el período 1992-2012, la ocurrencia de sequías afectó a más de mil millones de personas a nivel global, con pérdidas totales por un valor de 71000 millones de dólares. De acuerdo a este estudio, a nivel de población afectada, las sequías son el segundo fenómeno que más afecta a la sociedad, siendo superado por las inundaciones. El número de muertes humanas asociado a las sequías durante el período 1992-2012 fue levemente inferior a 2500 y significativamente inferior a las muertes ocasionadas por otros desastres naturales, como por ejemplo el caso de los terremotos, que causaron la muerte de más de 750000 personas (ONURRD, 2012). Cabe destacar que

durante la década de 1980, la ocurrencia de sequías cobró la vida de más de medio millón de personas solamente en África. No obstante, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), existe una tendencia a una disminución de las pérdidas de vidas asociadas a riesgos hidrometeorológicos, principalmente vinculados con la ocurrencia de sequías e inundaciones. El éxito en la reducción de las víctimas mortales se relaciona con el establecimiento de programas de alerta temprana y de respuesta a emergencias.

## **2.1 Definición de sequía**

Una definición conceptual consensuada sin tener en cuenta la realidad climática del área afectada y sin establecer umbrales de referencia, de entre las múltiples que podemos recopilar en diccionarios y enciclopedias de este vocablo, nos permite concluir que la sequía tiene lugar cuando se produce una deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado. Sin embargo, se requiere un conocimiento más detallado de las variables climáticas y disponer de series de datos de diferente escala según el nivel de detalle deseado (horario, diario, mensual, estacional) (García., 2008). La definición de sequía, es un período de déficit en las precipitaciones con impacto en la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas naturales; la sequía se diferencia de otros peligros naturales, porque siempre tiene un inicio lento y es difícil de observar y predecir bien (Beguería y otros., 2010).

Por su parte, la Sociedad Meteorológica Americana considera cuatro categorías de sequía: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Heim, 2002). Algunas de las definiciones comúnmente utilizadas son:

- (i) La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1990) define “sequía significa una deficiencia prolongada y extendida en la precipitación.”
- (ii) La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Sequía y la Desertificación (Secretaría General de las Naciones Unidas, 1994) define “la sequía significa el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de la tierra.”

(iii) La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1983) de las Naciones Unidas define un peligro de sequía como “el porcentaje de años, cuando los cultivos se pierden por la falta de la humedad.”

(iv) La enciclopedia del clima (Allaby, 2007) define una sequía como “un período prolongado - una temporada, un año o varios años - de deficientes precipitaciones con respecto a la estadística multianual media para una región.”

(v) (Gumbel, 1963) define una “sequía como el valor anual más pequeña de caudal diario”

(vi) (Palmer, 1965) describió una “sequía como una desviación significativa de las condiciones hidrológicas normales de un área.”

(vii) (Linsley et al., 1958) define “sequía como un período sostenido de tiempo sin precipitación significativa.”

(viii) La RAE define una sequía como “Tiempo seco de larga duración.”

Sin embargo, las definiciones de sequía varían, dependiendo de la variable utilizada para describirla. Por lo tanto, las definiciones de sequía se pueden clasificar en diferentes categorías que se discuten a continuación.

## 2.2 Clasificación de la sequia

La sequía se clasifica generalmente en cuatro categorías (Wilhite y Glantz, 1985; AMS, 2004), que incluyen:

- i. ***Sequía meteorológica:*** Se define como una falta de precipitación sobre una región durante un período de tiempo. Las precipitaciones han sido de uso común para el análisis de la sequía meteorológica (Pinkeye, 1966 citado en Mishra, 2010; Santos, 1983; Chang, 1991; Eltahir, 1992). Teniendo en cuenta la sequía como déficit de precipitación con respecto a los valores medios, varios estudios han analizado las sequías usando datos de precipitación mensual (Gibbs, 1975 citado en Mishra, 2010). Otros enfoques analizan la duración y la intensidad de la sequía en relación a la escasez de precipitaciones acumuladas (Chang y Kleopa, 1991; Estrela et al., 2000).

- ii. ***Sequía hidrológica:*** Se relaciona con un período con la insuficiencia de los recursos hídricos superficiales y subsuperficiales de los usos del agua establecidos de un sistema de gestión de los recursos hídricos dado; datos de caudal se han aplicado ampliamente para el análisis de la sequía hidrológica (Dracup et al., 1980; Zelenhasic y Salvai, 1987; Chang y Stenson, 1990; Frick et al., 1990; Mohan y Rangacharya, 1991; Clausen y Pearson, 1995). A partir del análisis de regresión que relaciona las sequías en el caudal con las propiedades de captación, se encuentra que la geología es uno de los principales factores que influyen en las sequías hidrológicas (Zecharias y Brutsaert, 1988; Vogel y Kroll, 1992).
- iii. ***Sequía agrícola:*** Se refiere a un período que se caracteriza por la disminución de la humedad del suelo y la consiguiente pérdida de cosechas sin ninguna referencia a los recursos hídricos de la superficie (Mishra y Singh, 2009). Una disminución de la humedad del suelo depende de varios factores que afectan a las sequías meteorológicas e hidrológicas, junto con las diferencias entre la evapotranspiración real y evapotranspiración potencial: La demanda de agua de las plantas que depende de las condiciones climáticas prevalecientes, las características biológicas de la planta específica y su etapa de crecimiento, y las propiedades físicas y biológicas del suelo (Mishra y Singh, 2009). Varios índices de sequía, basados en una combinación de precipitación, temperatura y humedad del suelo, se han derivado para estudiar las sequías agrícolas (Mishra y Singh, 2009).
- iv. ***Sequía socioeconómico:*** Se asocia con el fracaso de los sistemas de recursos hídricos para satisfacer las demandas de agua y por lo tanto que asocian las sequías con el oferta y la demanda de un bien económico (agua) (AMS, 2004). Sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico superior a la oferta como resultado de un déficit relacionado con el clima en el suministro de agua (Mishra y Singh, 2009).

## **2.3 Tierras secas**

No existe una definición única acordada del término tierras secas. Dos de las definiciones más aceptadas son las de la FAO y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra

la Desertificación (UNCCD, 2000). La FAO ha definido las zonas áridas como aquellas áreas con una longitud del período de crecimiento (LGP por sus siglas en inglés) de 1 a 179 días (FAO, 2000a); esto incluye regiones clasificadas climáticamente como árido, semiárida y subhúmeda seca (Figura 2.1.) (FAO, 2008). La clasificación de la UNCCD emplea la relación de la ecuación 2.2, el resultado indica la cantidad máxima de agua capaz de perderse, como vapor de agua, en un clima dado, por un tramo continuo de la vegetación que cubre todo el suelo y bien provisto de agua (FAO, 2008). Por lo tanto, incluye la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación de una región específica en un intervalo de tiempo dado (OMM, 1990).

### 2.3.1. Evapotranspiración.

El SENAMHI uso en el cálculo de la evapotranspiración referencial, el método Penman-Monteith (Allen et al., 1998), que es el único método recomendado por la FAO para determinar la evapotranspiración referencial y es expresado en  $mm\ dia^{-1}$  (MINAM, 2012) y se calcula de la siguiente manera:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}. \quad (2.1)$$

Dónde:

$ET_0$  : Evapotranspiración referencial [ $mm\ dia^{-1}$ ].

$R_N$  : Radiación neta del cultivo [ $MJm^{-2}dia^{-1}$ ].

$G$  : Densidad de flujo de calor en el suelo [ $MJm^{-2}dia^{-1}$ ].

$u_2$  : Velocidad del viento a 2 metros de altura [ $ms^{-1}$ ].

$e_a$  : Presión de vapor actual del aire a 2 metros de altura [ $kPa$ ].

$e_s$  : Presión de vapor de saturación a la temperatura del aire [ $kPa$ ].

$\Delta$  : Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación a la temperatura del aire. [ $kPa^{\circ}C^{-1}$ ].

$\gamma$  : Constante psicrométrica [ $kPa^{\circ}C^{-1}$ ].

$r_s$  : Resistencia superficial total,  $70\ ms^{-1}$ .

$r_a$  : Resistencia aerodinámica [ $sm^{-1}$ ].

Inicialmente en la generación de los mapas de evapotranspiración se asumió el valor de 2 m/s para los datos de velocidad de viento obtenidos a dos metros de altura debido a la dificultad que existe para interpolar esta variable (MINAM, 2012). Después se logra corregir estos mapas usando datos de viento obtenidos de la estación meteorológica, aplicando el método de residuales propuestos por Ninyerola et al. (2000) (Tabla 2.1) (MINAM, 2012).

Variable	Valores asumidos
Albedo del cultivo de referencia (Allen et al., 1989).	0.23
Altura media.	2 m
Altura del cultivo.	0.12 m
Resistencia superficial ( $r_s$ ).	$70ms^{-1}$
Emisividad del cultivo de referencia, césped (Brutsaert, 1982).	0.97 – 0,98
Densidad media del aire.	$1.2 kgm^{-3}$
Calor específico del aire.	$1.013 KJ kg^{-1}°C^{-1}$
Calor latente de vaporización.	$2.45 MJ kg^{-1}$

**Tabla 2.1.** Valores de algunas variables que se asuman constantes en el cálculo de la evapotranspiración referencial (MINAM, 2012).

### 2.3.2. Precipitación

El SENAMHI en la elaboración del mapa de precipitaciones utilizó dos métodos de interpolación: el método Kriging con semivariograma y el método de regresión lineal múltiple, ambos métodos de interpolación suponen que los datos tienen una distribución normal, por lo que fue necesario aplicar un logaritmo de base 10 a los datos de precipitación antes de iniciar el proceso, así reducimos los errores como el de anisotropía. (MINAM, 2012).

### 2.3.3. Índice de aridez

El índice de aridez (Ia) se define como la razón entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual, ( $Pa/ET_o$ ) fue adaptado por el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1997 a fin de contar con una evaluación unificada de los índices en toda la región (MINAM, 2012).



$$Ia = Pa/ETo. \quad (2.2)$$

Dónde:

*Ia* : Índice de aridez.

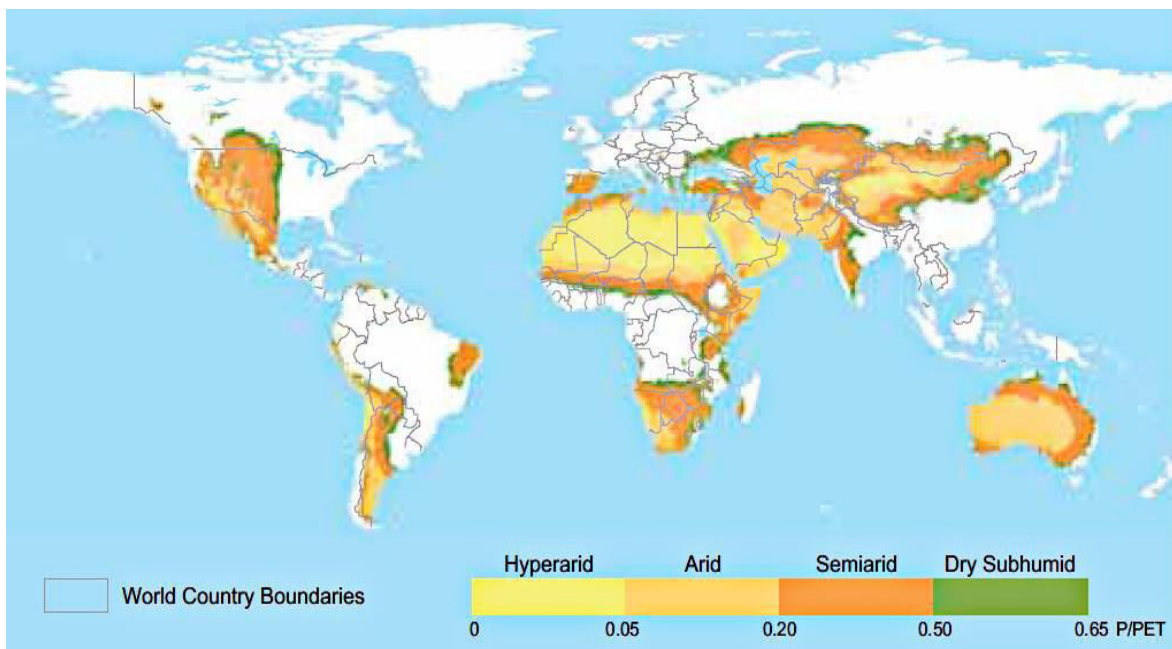
*Pa* : Precipitación media anual.

*ETo* : Evapotranspiración de referencia anual.

Para la estimación del índice se dividió ambos raster, es decir precipitación anual con evapotranspiración de referencia anual (MINAM, 2012). En la clasificación de la UNCCD, las tierras secas se caracterizan por una *Pa/ETo* de entre 0.05 y 0.65 ver tabla 2.4 (MINAM, 2011).

Se calcula que las tierras secas ocupan el 25% del territorio de América Latina y el Caribe, siendo Argentina el país con mayor extensión de tierras secas, con casi 2 millones de km<sup>2</sup>, seguido de Brasil, con algo más de 800 mil km<sup>2</sup> y de Perú con algo más de 500 mil km<sup>2</sup> (Torres, 2010). Cabe señalar que solamente Chile y Perú presentan zonas hiperáridas, las cuales ocupan cerca de 200 mil km<sup>2</sup> (Torres, 2010).

En el 2011, el MINAM, elaboró una primera aproximación del mapa de zonas áridas o tierras secas, utilizando el índice de aridez de la CLD. Se ha determinado una extensión de 32 809 369.81 ha (328 093.69 km<sup>2</sup>) para las tierras secas, siendo el 25.53 % del territorio nacional (Figura 2.2.) (MINAM, 2011).



**Figura 2.1.** Distribución de tierras secas en el mundo (FAO, 2008).

El mapa de tierras secas del Perú identifica cuatro categorías de tierras: hiperaridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas, siendo las tierras hiperaridas (los desiertos) las de mayor extensión ocupando el 9.39 % del territorio nacional (Figura 2.2) (MINAM, 2012).

Las zonas hiperaridas se caracterizan por una baja e irregular precipitación (la variación interanual de la precipitación puede ser del 100 %), escasa vegetación perenne y la agricultura y el pastoreo en general son inviables. El índice de aridez de esta zona es menor a 0.05 (MINAM, 2012).

Las zonas áridas se caracterizan por registrar precipitaciones anuales entre 80-150 mm y 200-350 mm (la variación interanual de la precipitación esta entre 50 % y 100 %) (MINAM, 2012). El pastoreo es posible pero no la agricultura de regadío. El índice de aridez de esta zona es de 0.05 a 0.20 (MINAM, 2012).

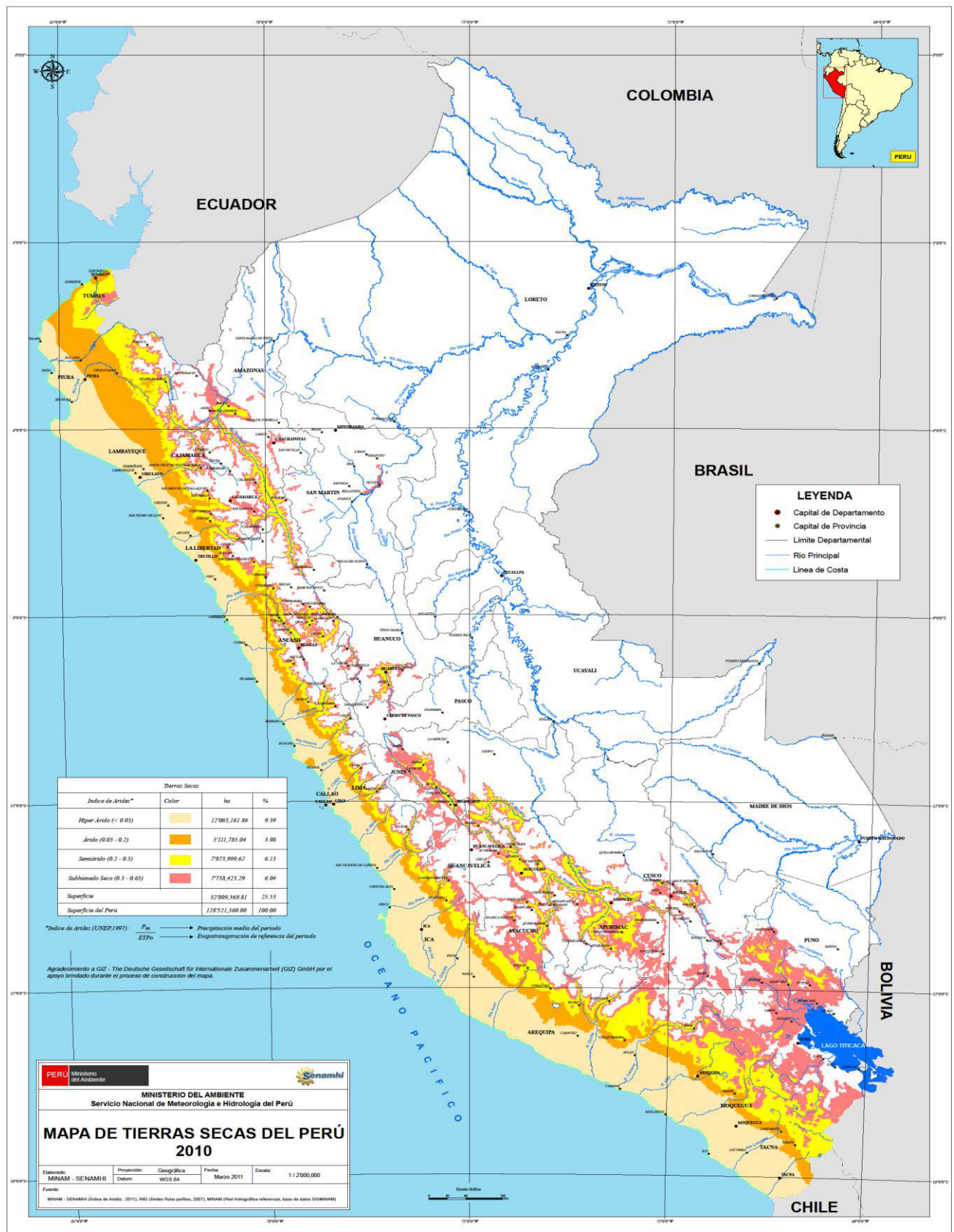


Figura 2.2. Mapa de tierras secas del Perú, 2010 (MINAM, 2011).

Las zonas semiáridas tienen una precipitación anual de 300-400 mm a 700-800 mm en verano y de 200-250 mm a 450-500 mm en invierno (variación anual de precipitación es de 25-50%). Es posible el pastoreo y agricultura de regadío, aunque con gran variabilidad en las producciones. El índice de aridez es de 0.20 a 0.50 (MINAM, 2012).

Las zonas subhúmedas secas tienen una variabilidad interanual de precipitación menor a 25% y la agricultura puede practicarse de manera regular. El índice de aridez es 0.5 a 0.65 ver tabla 2.2 (MINAM, 2012).

CATEGORIAS DE TIERRAS SECAS	INDICE DE ARIDEZ	EXTENSIÓN	
		Hectáreas	% del territorio nacional
Hiperárida	<0.05	12 065 161.86	9.39
Árida	0.05 – 0.20	511 785.04	3.98
Semiárida	0.20 – 0.50	7 873 999.62	6.13
Subhúmeda seca	0.50 – 0.65	7 758 423.29	6.04
<b>Total Tierras Secas</b>		<b>32 809 369.81</b>	<b>25.53</b>
<b>Total Perú</b>		<b>128 521 560.00</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 2.2.** Índice de aridez y total de tierras secas del Perú (2010). La superficie base utilizada es del mapa del desierto y desertificación del Perú, elaborado por INRENA (2006) (MINAM, 2012).

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas reciben apenas el 2% de la precipitación pluvial anual que cae en el país. Como se muestra en el Tabla 2.3., en estas áreas desérticas se reconocen ecosistemas característicos tales como las zonas de intercuenas hiperáridas, las lomas, los bosques secos y valles en la costa hiperárida-árida; los agroecosistemas alto andinos en la sierra semiárida, y los agroecosistemas amazónicos en la selva subhúmeda seca del país (MINAM, 2011).

<b>Región</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Ecosistema característicos</b>
<b>COSTA</b>	<p><b>Centro y costa sur</b>(entre Trujillo y Tacna, de 7° S a 18°S)</p> <p><b>Costa norte</b> (por encima de los 7° S).</p>	<p>Zonas hiperáridas. Reciben una precipitación menor los 50 mm/año.</p> <p>Lomas. Constituyen los oasis donde esta reducida la vida humana costeña.</p> <p>Bosques Estacionalmente Secos. Reciben regularmente entre 100 y 150 mm/año, cantidad es alterada cada cierto tiempo por el evento denominado El niño. Este evento puede cambiar el escenario natural drásticamente, tal como ocurrió en el 82-83 cuando las lluvias alcanzaron entre 1000 mm y 4000 mm en tan solo 5-6 meses (diciembre 82-abril/mayo 83).</p>
<b>SIERRA</b>	<b>Sierra norte y sierra centro.</b>	Agroecosistema semiáridos. En el de los ecosistemas de montaña andinos, los paisajes naturales corresponden a zona árida y semiárida, con precipitaciones entre los 200 y 1000 mm/año concentrada en un 70 % entre los meses de diciembre y marzo.
<b>SELVA</b>	<b>Selva norte</b> (San Martín y Amazonas.)	Agroecosistema interandinos subhúmedos secos.

**Tabla 2.3.** Ecosistemas característicos en los desiertos y áreas de desertificación en el Perú (MINAM, 2011).

La clasificación de las zonas áridas ha tenido gran aceptación por la FAO tanto por su simplicidad como por su terminología, pero con modificaciones. La CLD se ha basado en el *Índice de aridez* ( $Ia = Pa/ET_o$ ) calculado igualmente sobre la base de la relación entre la precipitación anual y la evapotranspiración, que fue adoptado por la PNUMA en 1997 a fin de contar con una evaluación unificada de los índices en toda la región. De acuerdo a este índice, se definen 6 grupos climáticos, tres de los cuales responden a la categoría de zonas áridas (MINAM, 2011).

Zona Árida	Categorías	Índice de aridez ( $Ia = P_a/ET_0$ )
	HIPERARIDA	<0.05
	ÁRIDA	0.05 a 0.20
	SEMIARIDA	0.20 a 0.5
	SUBHÚMEDA SECA	0.5 a 0.65
	SUBHÚMEDA HÚMEDA	0.65 a 1.0
	HÚMEDA	>1.0

$Ia$  : Índices aridez.

$P_a$ : Precipitación anual.

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia anual.

**Tabla 2.4.** Clasificación de las zonas áridas según la CLD (MINAM, 2011).

Así, respecto de las tierras secas, en un extremo están las zonas hiperáridas que presentan mayor evapotranspiración que precipitación (índice de aridez < 0.05) y son reconocidas comúnmente como los desiertos propiamente dicho (MINAM, 2011). En el otro extremo están las zonas subhúmedas secas (índice de aridez: 0.5 - 0.65), es decir, que no son propiamente áridas, sino que concentran sus precipitaciones en pocos meses, o que podrían pasar a ser áridas debido a ligeros cambios climáticos (MINAM, 2011).

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 3.1 Índices de sequía

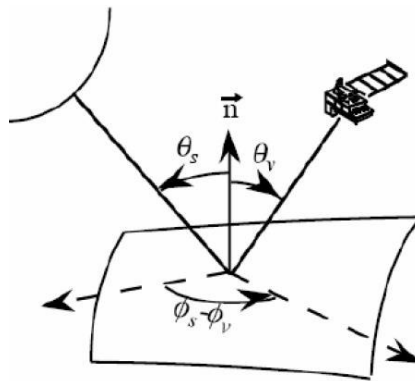
#### 3.1.1 Índice de condición de vegetación (ICV)

El producto NDVI del MODIS/Terra se genera, suponiendo que la superficie de la Tierra es uniforme de reflectancia lambertiana y la atmósfera es uniforme horizontalmente. La reflectancia TOA ( $\rho_{TOA}$ ), es decir, reflectancia en el tope de la atmósfera es calculada según la ecuación (3.1),

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L d^2}{\mu_s E_s} . \quad (3.1)$$

Donde  $L$  es la radiancia media en  $Wm^{-2}sr^{-1}$  que llega al sensor,  $E_s$  es el flujo solar en la parte superior de la atmósfera en  $Wm^{-2}$ ,  $\mu_s = \cos(\theta_s)$ , y  $\theta_s$  es el ángulo cenit del Sol.

El espesor óptico de la atmósfera será denotado por  $\tau$ , la dirección de visión será denotada por el ángulo cenit  $\theta_v$  y el acimut  $\phi_v$ , y los ángulos cenit y acimut del Sol por  $\theta_s$  y  $\phi_s$  respectivamente (Figura 3.1.). El término  $\rho_c$  será la reflectancia del objetivo. Los problemas de absorción no se tendrán en cuenta en esta parte.



**Figura 3.1.** Se muestra el ángulo cenit del Sol  $\theta_s$ , ángulo de visión  $\theta_v$ , ángulo acimut relativo  $\phi_s - \phi_v = \Delta\phi$  y la normal de la superficie  $\vec{n}$  (Rahman y Dedieu, 1994).

El algoritmo SMAC (Simplified Method for Atmospheric Corrections), propuesta por Rahman y Dedieu en 1994, que es un método semiempírico y se basa en la teoría de transferencia radiativa que considera el efecto de scattering y absorción de los aerosoles y las moléculas de los gases que se encuentra en la atmósfera, de tal manera, que la energía radiante atenúa o aumenta (en el caso de scattering múltiple) respecto a los coeficientes utilizados en este modelo, tales como la transmitancia de cada tipo de gas, el espesor óptico, el albedo esférico de la Tierra, etc. El modelo SMAC estima la reflectancia de un objeto en la superficie de la Tierra a partir de la reflectancia TOA (Rahman y Dedieu, 1994). Para una superficie lambertiana uniforme, el modelo SMAC utiliza la ecuación (3.2) para la estimación de la reflectancia de un objeto ( $\rho_c$ ) en la superficie de la Tierra (Rahman y Dedieu, 1994):

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_c}{1-\rho_c S} \right\}, \quad (3.2)$$

Con  $T(\theta_s) = e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s)$  y  $T(\theta_v) = e^{-\tau/\mu_v} + t_d(\theta_v)$

Donde  $\rho_{TOA}$  es la reflectancia TOA, es decir, la cantidad total de radiación recibida por el satélite,  $t_g$  es la transmitancia total (hacia arriba y abajo) de las moléculas de los gases que se encuentran en la atmósfera, teniendo en cuenta la absorción atmosférica,  $\rho_a$  es la reflectancia atmosférica, está en función de los aerosoles, propiedades ópticas, ángulo de iluminación, ángulo de visión y acimut relativo entre el Sol y el observador,  $\rho_c$  es la reflectancia del cuerpo u objeto en la superficie de la Tierra,  $S$  es el albedo atmosférico de la atmósfera,  $T(\theta_s)$ ,  $T(\theta_v)$  representa la transmitancia total (difusa + directa) de los gases atmosféricos considerados con una distribución constante, como el nitrógeno y argón, hacia abajo y hacia arriba respectivamente,  $\tau$  es el espesor óptico atmosférico ( $e^{-\tau/\mu_s}$  y  $e^{-\tau/\mu_v}$  siendo las transmitancias atmosféricas directas,  $t_d(\theta_s)$  y  $t_d(\theta_v)$  son la transmitancia difusa atmosférica,  $\mu_s = \cos(\theta_s)$  es el coseno del ángulo cenit del Sol,  $\mu_v = \cos(\theta_v)$  es el coseno del ángulo cenit de visión,  $\Delta\phi$  es el ángulo acimut relativo entre la dirección del Sol y satélite (Rahman y Dedieu, 1994). A partir de la ecuación (3.2) despejamos la reflectancia del cuerpo sobre la superficie y obtenemos la ecuación (3.3)

$$\rho_c = \frac{\rho_{TOA} - \rho_a t_g}{t_g T_{\theta_s} T_{\theta_v} + (\rho_{TOA} - \rho_a t_g) S}, \quad (3.3)$$



En la presente tesis se utilizó el índice más difundido e históricamente utilizado es el NDVI, formulado por (Rouse, 1974), cuya fórmula se muestra en la ecuación (3.4):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}, \quad (3.4)$$

donde,  $\rho_{NIR}$  y  $\rho_R$  representan las reflectancias del objeto en la superficie del suelo del canal que corresponde a la región del infrarrojo cercano y del rojo respectivamente. La ecuación (3.4) es una fórmula semiempírica (Jackson y Huete, 1991).

Para las regiones con vegetación, el clima relacionado con los cambios del *NDVI*, que relacionado al ecosistema y los impactos de la sequía sobre la vegetación no pueden ser fácilmente detectados a partir de datos directamente del *NDVI* (Du et al., 2013). Por lo tanto, Kogan (1995b) desarrolló el índice de condición de la vegetación (*ICV*) para controlar las diferencias locales en la productividad de los ecosistemas. El *ICV* es una normalización basada en píxeles del *NDVI*, el *ICV* es un indicador para la vigilancia de la sequía es cuando la vegetación vigorosa es decir,  $NDVI \approx 1$ , se ve afectada por la variación climática (Du et al., 2013). En una determinada región, clima y estación del año, la sequía debilita extremadamente el crecimiento de la vegetación y da lugar a un  $NDVI \approx 0$  en las observaciones de varios años, por el contrario, un  $NDVI \approx 1$  representa una condición climática óptima (Du et al., 2013). *ICV* es un mejor indicador del estrés hídrico de la vegetación de *NDVI* (Du et al., 2013). Se define mediante la siguiente fórmula (3.5):

$$ICV = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}. \quad (3.5)$$

Los valores de los píxeles del *NDVI* son suavizadas con el filtro Savitzky - Golay (Chen et al., 2004).  $NDVI_{max}$  y  $NDVI_{min}$  son, respectivamente, el máximo valor del *NDVI* y el mínimo valor del *NDVI*. El *ICV* varía de 0 a 1, que corresponde a los cambios en la condición de la vegetación de extremadamente desfavorable a óptima. En caso de un mes extremadamente seco, el estado de la vegetación es escaso y el  $ICV \approx 0$ . La vegetación refleja un estado adecuado cuando el  $ICV \geq 0.5$ . En condiciones óptimas de la vegetación, el  $ICV \approx 1$ , ver Tabla 3.2. (Jain et al., 2009).

### 3.1.2 Índice de condición de temperatura (ICT)

El producto MOD11A2 del MODIS/Terra brinda información de temperatura superficial del suelo, la señal infrarroja térmica recibida por el sensor del satélite es determinada por la temperatura de la superficie observada, la emisividad y reflectividad de la superficie, la emisión, absorción, scattering atmosférico y la radiación solar. Hay evidencia de que las emisividades de las distintas coberturas terrestres son relativamente estables en el rango espectral de  $10.5 \mu m - 12.5 \mu m$ , donde se localizan las bandas 31 y 32 de MODIS (Wan y Dozier, 1996).

Conociendo las emisividades de las distintas coberturas de la superficie, se puede generalizar un algoritmo multicanal corrigiendo los efectos atmosféricos bajo condiciones de la atmósfera desconocidas (Wan y Dozier, 1996). Para obtener las estimaciones de TSS a nivel de píxel con este método, fundamentalmente se debe formular un algoritmo generalizado *split-window*, con el previo conocimiento de las emisividades de la superficie observada (Wan, 1999). La forma numérica generalizada de la ecuación *split-window* es de tipo lineal y tiene en cuenta básicamente las temperaturas de brillo y las emisividades en las bandas 31 y 32 de MODIS. La ecuación *split-window* generalizada es la siguiente:

$$T_{SS} = \left( A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31}+T_{32}}{2} + \left( B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{31} - T_{32}) + C, \quad (3.6)$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad ( $\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$ ),  $\Delta\varepsilon$  es la diferencia de emisividad entre la banda 31 y 32 ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$ ) y  $T_{31}$  y  $T_{32}$  la temperatura de brillo en las bandas 31 y 32. Los parámetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  y  $C$  son propios de la ecuación *split-window* ajustada (Wan y Dozier, 1996).

Los coeficientes óptimos de la ecuación se obtienen de la siguiente manera: 1) los perfiles de temperatura atmosférica son separados en 2 grupos de acuerdo a la temperatura del aire cercano a la superficie ( $T_{aire} \leq 280 K$  ó  $T_{aire} > 280 K$ ), así en el primer grupo se incluyen atmósferas de invierno y en el segundo grupo, atmósferas de verano cálidas; 2) las columnas de vapor de agua atmosférico son separadas en intervalos de 0.5 cm; 3) la

condición de la temperatura de superficie es separada en 2 grupos según  $T_{aire} - 16 K \leq T_{ss} \leq T_{aire} + 4 K$  ó  $T_{aire} - 4 K \leq T_{ss} \leq T_{aire} + 16 K$ , así el primer grupo representa la condición de noche y el segundo, la de día; 4) las emisividades son especificadas por  $0.89 \leq \varepsilon \leq 1$  en pasos de 0.01 y  $-0.025 \leq \Delta\varepsilon \leq 0.015$  en pasos de 0.005; 5) 9 ángulos de visión son seleccionados para cubrir todo el rango de visión desde el nadir a 65.5°. Los coeficientes en los algoritmos serán determinados por análisis de regresión separada de los datos simulados en cada grupo de temperatura de superficie, en cada intervalo de vapor de agua de cada columna a esos 9 ángulos de visión. La columna total de vapor de agua y la temperatura del aire se obtienen de los productos MODIS de perfiles atmosféricos. En análisis del error integral se ha hecho en amplio rango de condiciones atmosféricas y de superficie. La precisión del algoritmo generalizado *Split-window* es mejor que 1 K para los tipos de cobertura del suelo, de emisividad conocida (Wan, 1999).

A medida que la superficie es afectada por la sequía, esta se encontrará con un estrés térmico. Por lo tanto, el índice de condición de temperatura (ICT), se propone como un indicador basado en el estrés térmico para determinar la sequía, ya que es un fenómeno relacionado con la temperatura (Kogan, 1995a). Este índice asume que para un evento de sequía se reducirá la humedad del suelo a causa del estrés térmico, ya que existe mayor temperatura superficial del suelo (TSS) en el año de sequía que en los años normales. El algoritmo del ICT es similar al ICV y sus condiciones se estimaron con relación a la temperatura máxima/mínima en una serie de tiempo dada.

Frente al NDVI, cuando la TSS es alta el crecimiento de la vegetación indica condiciones desfavorables o de sequía y cuando la TSS es baja indica condiciones muy favorables (Singh et al., 2003). Por lo tanto, la fórmula ICT se modificó como la siguiente expresión (3.7):

$$ICT = \frac{TSS_{max} - TSS}{TSS_{max} - TSS_{min}}. \quad (3.7)$$

Donde TSS,  $TSS_{max}$  y  $TSS_{min}$  son los valores de TSS, el máximo valor de la TSS y mínimo valor de la TSS de cada píxel para el mismo mes, respectivamente, durante el

período de estudio de 2000 a 2013. A medida que el ICT es evaluado en un proceso de sequía, sus valores son cercanos o iguales a 0, en cambio el ICV en condiciones de humedad, el ICT es evaluado cercano a 1, ver Tabla 3.2. (Du et al., 2013).

### 3.1.3 Índice de condición de precipitación (ICP)

La imagen del TRMM 3B43 proporciona datos de precipitación mensual con una resolución espacial de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  da información sobre la sequía meteorológica. La precipitación para un determinado lugar y tiempo tiene un componente clima, pero no se puede analizar directamente con ICV e ICT. En el presente trabajo, el índice de condiciones de la precipitación (ICP), que se normalizó usando los datos TRMM 3B43 mediante un algoritmo similar al ICV. El ICP se define para la detección de los déficits de precipitación para un clima dado (Du et al., 2013). El ICP tiene la siguiente expresión:

$$ICP = \frac{TRMM - TRMM_{min}}{TRMM_{max} - TRMM_{min}}. \quad (3.8)$$

Donde TRMM,  $TRMM_{max}$  y  $TRMM_{min}$  son los valores de los píxeles de la precipitación, el máximo valor y el mínimo valor del mismo, respectivamente. El ICP también varía de 0 a 1, y corresponde a los cambios en la precipitación entre muy desfavorable a óptima (Du et al., 2013). En caso de una sequía meteorológica, la precipitación es muy baja, por lo que tiene un valor cercano o igual a 0, y en condiciones de inundación, el ICP tiene un valor cercano a 1, ver Tabla 3.2. (Du et al., 2013).

### 3.1.4 Índice de precipitación estandarizado (IPE)

McKee et al. (1993, 1995), propusieron el SPI (*Standardized Precipitation Index*), este índice en la presente tesis será denominada Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) para evaluar la precipitación irregular. Datos de precipitación mensual son tomados de *Ground Water Department*, Jodhpur, Rajasthan. Dado que los datos de precipitación están sesgados en su mayoría, con el fin de calcular IPE, los datos de precipitación son normalizados usando la función gamma (ecuación 3.10.). El IPE se basa en la probabilidad

de precipitación para cualquier escala de tiempo deseado e invariante espacialmente (Guttman, 1998, 1999). Para el cálculo del IPE para un lugar determinado, se parte de la serie histórica de la precipitación mensual de una estación meteorológica correspondiente al periodo requerido. La distribución Gamma definida por su función de densidad de probabilidad como se muestra en la expresión (3.9) (Edwards y McKee, 1997):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad \text{para } x > 0, \quad (3.9)$$

dónde:

- $\alpha > 0$  : es el parámetro de forma,
- $\beta > 0$  : es el parámetro de escala,
- $x > 0$  : es la cantidad de precipitación,
- $\Gamma(\alpha)$  : es la función Gamma y
- $g(x) = 0$ , para  $x < 0$ .

La función Gamma es definida por la integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy. \quad (3.10)$$

En general, la función Gamma se evalúa numéricamente o utilizando los valores tabulados en función del valor tomado por el parámetro  $\alpha$  (Thom, 1958).

Para modelar los datos observados con una función de densidad de distribución gamma, es necesario estimar adecuadamente los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  (Thom, 1958). Diferentes métodos han sido sugeridos en la literatura para la estimación de estos parámetros, por ejemplo, en Edwards & McKee (1997) sugieren que la estimación de estos parámetros utilizando la aproximación de Thom (1958) para una máxima probabilidad como sigue:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad (3.11)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}. \quad (3.12)$$

Donde  $\bar{x}$  representa el promedio de la precipitación y  $n$  es el número de observaciones

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}. \quad (3.13)$$

La estimación de los parámetros se puede mejorar aún más mediante el uso del enfoque interactivo sugerido en Wilks (2011).

Para maximizar la ecuación (3.9), es más simple tomar logaritmos antes de diferenciar y poner a cero (Thom, 1958). Esto da:

$$L = -n\hat{\alpha} \log \hat{\beta} - n \log \Gamma(\hat{\alpha}) + (\hat{\alpha} - 1)\Sigma \log x - \frac{1}{\hat{\beta}} \Sigma x$$

$$\begin{bmatrix} \alpha^* \\ \beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha}^2} & \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha} \delta \hat{\beta}} \\ \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha} \delta \hat{\beta}} & \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\beta}^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \hat{\alpha}} \\ \frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \alpha^* \\ \beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -n\Gamma''(\hat{\alpha}) & \frac{-n}{\hat{\beta}} \\ \frac{-n}{\hat{\beta}} & \frac{n\hat{\alpha}}{\hat{\beta}^2} - \frac{2\Sigma x}{\hat{\beta}^3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma \ln(x) - n \ln(\hat{\beta}) - n \Gamma'(\hat{\alpha}) \\ \frac{\Sigma x}{\hat{\beta}^2} - \frac{n\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

donde  $\alpha^*$  y  $\beta^*$  son generalmente mejores estimaciones de  $\alpha$  y  $\beta$  que  $\hat{\alpha}$  y  $\hat{\beta}$ . El proceso se repite hasta que el algoritmo converge. Si no se detecta la convergencia se utilizan las estimaciones de Thom (1958) para  $\alpha$  y  $\beta$ , se utilizan todos los datos disponibles para adaptarse a estos parámetros (Wilks, 2011).

Después de estimar los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  de la función de densidad de probabilidad  $g(x)$  se integra con respecto a  $x$  y se obtiene una expresión de probabilidad acumulada  $G(x)$  en una cierta cantidad de precipitación observado para un mes dado y una específica escala de tiempo (Giuseppe R. et al., 2007).

$$G(x) = \int_0^x g(x') dx', \quad (3.15)$$

reemplazando (3.9) en (3.15)

$$G(x) = \frac{1}{\hat{\beta} \hat{\alpha} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x'^{\hat{\alpha}-1} e^{-x'/\hat{\beta}} dx', \quad (3.16)$$

dando la forma  $x'/\hat{\beta}$

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x \left(\frac{x'}{\hat{\beta}}\right)^{\hat{\alpha}-1} \left(\frac{x'}{\hat{\beta}}\right)^{-1} e^{-x'/\hat{\beta}} \frac{dx'}{\hat{\beta}}, \quad (3.17)$$

tomando  $t = x'/\hat{\beta}$  esta ecuación se convierte en la función gamma incompleta

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt. \quad (3.18)$$

La función Gamma no está definido por  $x = 0$  y ya que no puede haber precipitación, la probabilidad acumulada se convierte en:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x). \quad (3.19)$$

Donde  $q$  es la probabilidad sin precipitación. La probabilidad acumulada se transforma entonces en una distribución normal con media a cero y una desviación estandar igual a uno y se obtiene el índice IPE (Edwards y McKee, 1997 y Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

El enfoque anterior, sin embargo, no es ni práctico ni numéricamente fácil de usar si hay muchos puntos de la rejilla o muchas estaciones en que para calcular el índice IPE. En este caso, un método alternativo se describe en Edwards y McKee (1997) utilizando la técnica de conversión aproximada desarrollada en Abramowitz y Stegun (1965) que convierte la probabilidad acumulada en una variable estándar  $Z$ . El índice IPE se define entonces como:

$$Z = \text{IPE} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5, \quad (3.20)$$

$$Z = \text{IPE} = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1, \quad (3.21)$$

donde

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5, \quad (3.22)$$

y

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1, \quad (3.23)$$

donde  $x$  es la precipitación,  $H(x)$  es la probabilidad acumulada de precipitación observada y  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  son constantes con los siguientes valores Lloyd-Hughes y Saunders (2002):

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517 & c_1 &= 0.802853 & c_2 &= 0.010328, \\ d_1 &= 1.432788 & d_2 &= 0.189269 & d_3 &= 0.001308. \end{aligned}$$

Existen otros tipos de distribución estadística, en algunos casos, para proporcionar un mejor modelo de precipitación para algunas estaciones o para escalas de tiempo particulares, tales como, por ejemplo, la distribución de Poisson-gamma o la distribución logarítmica normal. Si el valor del parámetro  $\alpha$  es muy alto, la distribución gamma tiende hacia una

distribución normal y, por lo tanto, puede ser más eficaz, a nivel computacional, para estimar el índice IPE utilizando una distribución normal donde  $X_{ij}$  es la precipitación de la estación de observación de pluviómetro  $i$  en una serie histórica de  $j$  años,  $\bar{X}_i$  es la media estacional de la serie histórica y  $\sigma_i$  es la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Entonces, el índice IPE es definido por la diferencia entre la precipitación total mensual histórica y su media estacional a largo plazo entre la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Por lo tanto:

$$IPE = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{\sigma_i}. \quad (3.23)$$

Dónde:

$X_{ij}$ : Precipitación de la estación observada y observación histórica,


























$\bar{X}_i$ : Precipitación media de la estación observada y

$\sigma_i$ : Desviación estándar de la estación observada.

El IPE representa el número de desviaciones estándar en que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico (Galván, 2011). El cálculo en varias escalas de tiempo se muestra en la Tabla 3.1. (McKee et al, 1993). Cinco clases de IPE se muestran en la Tabla 3.2.

IPE	Descripción
IPE-1	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 1 mes
IPE-3	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses
IPE-6	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 6 meses
IPE-9	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 9 meses
IPE-12	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 12 meses

**Tabla 3.1.** Descripción de las escalas de tiempo del IPE (McKee et al, 1993).

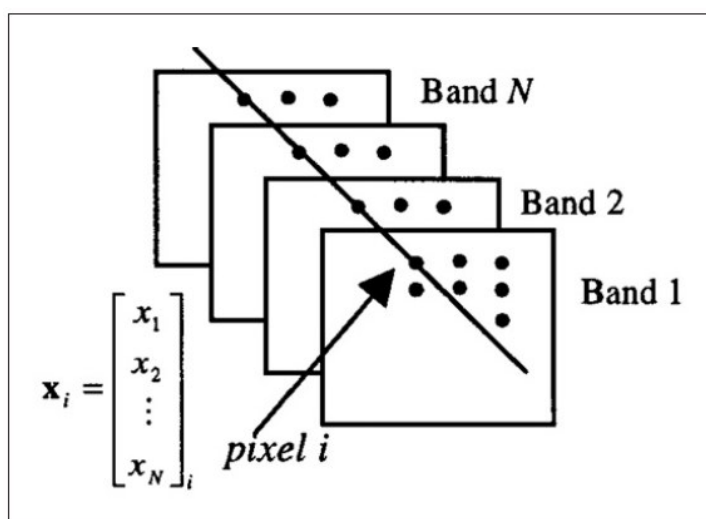
Esquema de Clasificación Clases De Sequia	ICV	ICT	ICP	IPE	ISS
Sequía Extrema	<0.1 	<0.1 	<0.1 	<-2.0 	<0.2 
Sequía Severa	<0.2 	<0.2 	<0.2 	<-1.5 	<0.3 
Sequía Moderada	<0.3 	<0.3 	<0.3 	<-1.0 	<0.4 
Sequía Leve	<0.4 	<0.4 	<0.4 	<-0.5 	<0.5 
No hay Sequia	>0.4 	>0.4 	>0.4 	>0.0 	>0.5 

**Tabla 3.2.** Esquema de clasificación ICV, ICT, ICP, IPE y ISS (Du et al., 2013).



### 3.1.5 Índice de sequía sintetizado (ISS) usando el análisis de componentes principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) tiene como propósito reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos (Richards y Jia, 2013; Deng et al, 2008.). El ACP se basa en el hecho de que las bandas vecinas de las imágenes multiespectrales están altamente correlacionadas y con frecuencia transmiten casi la misma información sobre el objeto (Graig y Jie, 2002). El análisis se utiliza para transformar los datos originales para eliminar la correlación entre las bandas. En el proceso, se identifica la combinación lineal óptima de las bandas originales que representan la variación de los valores de píxeles en una imagen (Graig y Jie, 2002).



**Figura 3.2.** Vector de píxeles en el análisis de componentes principales (adaptado de Gonzales y Woods (2002)).

El ACP emplea las propiedades estadísticas de las bandas para examinar la dependencia o correlación entre ellas. Sin embargo, se pueden encontrar muchos sinónimos para el ACP, como la transformación de Hotelling o la transformación de Karhunen-Loeve (González y Woods 2002). Todas estas transformaciones se basan en el mismo principio matemático conocido como descomposición de valores propios de la matriz de covarianza de las bandas

de imágenes multiespectrales. Se presenta una breve formulación del principio. (González y Woods, 2002 y Schowengerdt, 2006).

Un vector de píxeles de la imagen se puede expresar:

$$x_i = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T. \quad (3.24)$$

Los valores  $x_1, x_2, \dots, x_N$  corresponden a una misma posición de píxel en la imagen multiespectrales. La dimensión de ese vector de imagen es igual al número de bandas multiespectrales  $N$ , en el caso del presente trabajo serian 3 bandas (ICV, ICT e ICP). Para una imagen multiespectrales con  $m$  filas y  $n$  columnas habrá  $M = m * n$  vectores, es decir,  $i = 1, \dots, M$ . El vector medio de todos los vectores de imagen se expresa como:

$$\bar{m} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [x_1, x_2, \dots, x_N]^T. \quad (3.25)$$

La matriz de covarianza de  $x$  se define como:

$$Cov(x) = E\{(x - E(x))(x - E(x))^T\}, \quad (3.26)$$

dónde:

$E$  = operador de expectativa;

Superíndice  $T$  = operación de transposición, y

$Cov$  = notación para la matriz de covarianza.

La matriz de covarianza se aproxima mediante el siguiente cálculo:

$$C_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{m})(x_i - \bar{m})^T. \quad (3.27)$$

El ACP se basa en la descomposición del valor propio de la matriz de covarianza, que toma la forma de:

$$C_x = ADA^T, \quad (3.28)$$

dónde:

$$D = diag(\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N). \quad (3.29)$$

Es la matriz diagonal compuesta por los valores propios  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$  de la matriz de covarianza  $C_x$ , y  $A$  es la matriz ortonormal compuesta por los correspondientes autovectores de dimensión  $N$   $a_k (k = 1, 2, \dots, N)$  de  $C_x$  como sigue:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_N). \quad (3.30)$$

La transformación lineal definida por:

$$y_i = A^T x_i \quad (i = 1, 2, \dots, M). \quad (3.31)$$

Es el vector de píxeles ACP, y todos estos vectores de píxeles forman las bandas del ACP (transformadas) de las imágenes originales (Graig y Jie, 2002).

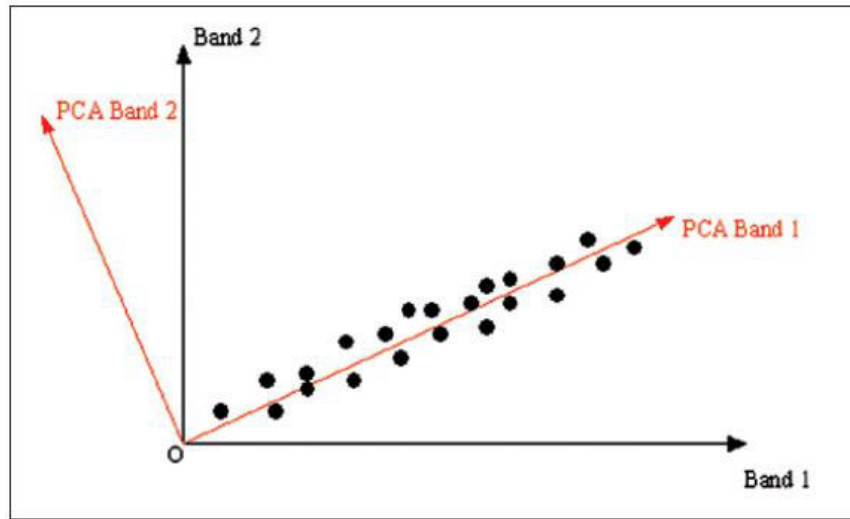
Los autovalores y vectores propios se disponen en orden descendente de forma que  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ , por lo tanto las primeras  $K$  filas ( $K \leq N$ , usualmente  $K \ll N$ ) de la matriz  $A^T$ , es decir, los primeros  $K$  vectores propios  $a_j^T$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ), se puede utilizar para calcular una aproximación de las imágenes originales de la siguiente manera:

$$z_i = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_k \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} \dots & a_{kN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (3.32)$$

Donde el vector de píxeles  $z_i$  formará las primeras bandas  $K$  de las imágenes del ACP.

Tales bandas ACP formadas tienen el mayor contraste o variación en la primera banda y el menor contraste o varianza en la última banda. Por lo tanto, las primeras  $K$  bandas del ACP suelen contener la mayor parte de la información que reside en las imágenes multiespectrales originales y pueden utilizarse para análisis más efectivos y precisos debido a que el número de bandas de imágenes y la cantidad de ruido de imagen implicado se reducen. Según González y Woods (2002), las bandas del ACP son mutuamente independientes u ortogonales y su matriz de covarianza toma la forma de:

$$C_z = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_k) \quad (3.33)$$



**Figura 3.3.** Geometría de análisis de componentes principales y bandas PCA (Graig y Jie, 2002).

La geometría del concepto del ACP se ilustra en la Figura 3.3, donde los datos originales consisten en dos bandas, banda 1 y banda 2. Existe una correlación considerable entre las dos bandas: un cambio en la banda 1 crea un cambio casi lineal en la banda 2. Cuando se genera el ACP, la correlación entre la banda del ACP 1 y 2 desaparece. Otro aspecto del ACP que se observa en la ilustración se refiere a la variabilidad dentro de las bandas (Graig y Jie, 2002). Una vez que ha tenido lugar la transformación, la banda del ACP 1 representa la cantidad máxima de variabilidad o contraste posible en la imagen y la banda del ACP 2 representa la segunda cantidad mayor. Es probable que esta tendencia continúe en las primeras bandas del ACP, y el resto contiene información cada vez menos útil (Graig y Jie, 2002).

El procedimiento del ACP, calcula en primer lugar la matriz de covarianza y valores propios, vectores propios entre todos los datos de entrada, en segundo lugar, obtiene el porcentaje de varianza explicada establecidos por cada componente de datos totales, y, finalmente, una serie de nuevos datos (llamada autovalores o componentes) se calcula multiplicando el vector propio para los datos de entrada originales (Lasaponara, 2006).

El ACP, se ha usado como una herramienta de compresión de datos, descartando componentes menores con pequeños valores que explican los índices. Aunque ICV, ICT e ICP pueden ser utilizados para vigilar la sequía de la vegetación, el suelo y el clima, la información correlacionada de estos índices son útiles para supervisar la sequía integral (Du et al., 2013). Por ejemplo, si las demás condiciones son casi normales, la vegetación puede ser más sensible a la humedad durante la formación del dosel (aparición de hojas) y para la temperatura durante la floración (Du et al., 2013).

En la presente tesis, el ACP se utilizó para obtener la información del ICV, ICT e ICP y deseche la señal correlacionada de ellos. La transformación de componentes principales se realizó con el software ENVI. El ICV, ICT e ICP en cada mes se introducen como bandas espectrales originales y se calculan el mismo número de bandas de las componentes principales (Du et al., 2013).

$$CP1_{(75\%(ICV, ICT \text{ e } ICP))} = ISS \quad (3.34)$$

Desde el primer componente principal (CP1) siempre contiene información de más de un 75 % a partir de ICV, ICT e ICP y se define como un nuevo índice de sequía, es decir, el índice de sequía sintetizado (ISS) (Du et al., 2013). Basado en el método del ACP, se ha producido un conjunto de datos del ISS de marzo del 2000 a diciembre del 2013. El ISS también se divide en cinco clases (Tabla 3.2.) (Du et al., 2013).

### 3.2 Ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico

Para analizar los resultados cuantitativos se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson y la raíz del error medio cuadrático (REMC) (Wilks 2011).

#### 3.2.1 El coeficiente de correlación lineal

En 2011 Wilks define al coeficiente de correlación lineal de Pearson que está dado por la razón de la covariancia existente entre las dos variables y el producto de sus desviaciones estándar (3.35)

$$r_{xy} = \frac{COV(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} \right\}} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right\}^{1/2}} \quad (3.35)$$

El coeficiente de correlación lineal toma valores entre -1 y +1 y su interpretación y categoría son (Wilks, 2011 y Taylor 1990):

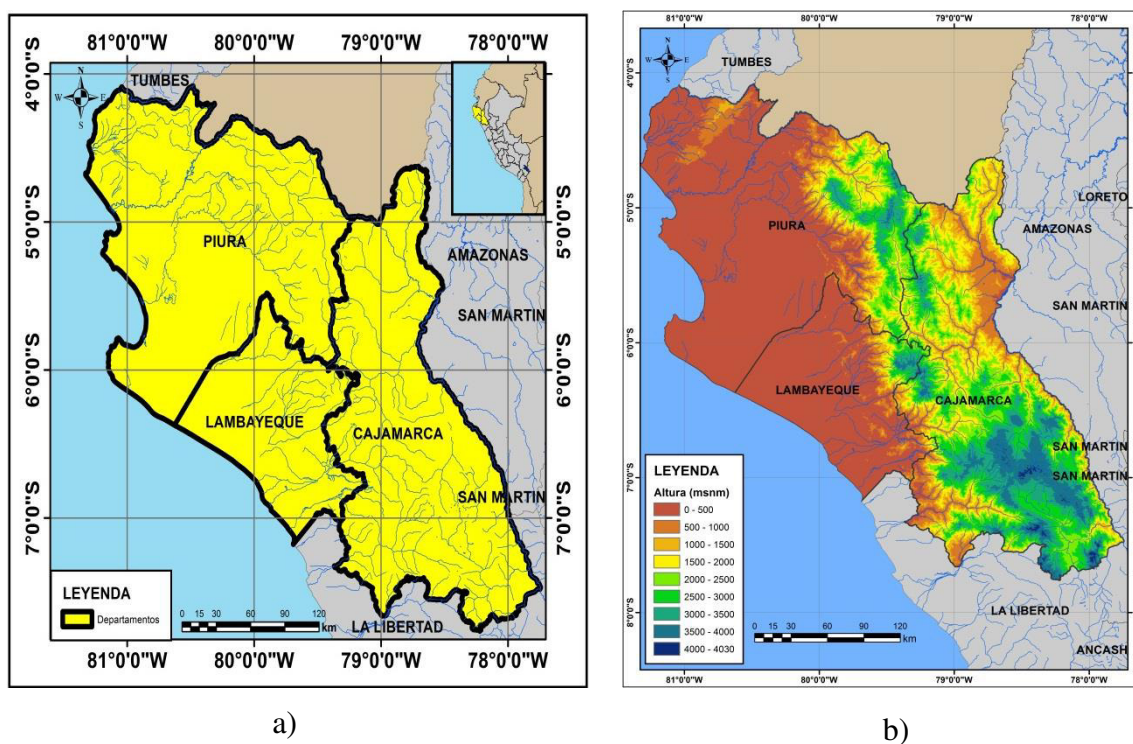
- Si  $Y$  tiende a aumentar a medida que  $X$  aumenta, se dice que la correlación es una *correlación positiva* o *directa*. Si  $Y$  tiende a disminuir a medida que  $X$  aumenta, se dice que es una *correlación negativa* o *inversa*.
- El valor cercano o igual a cero indica poca o ninguna relación lineal entre las variables.
- Valores de  $r \leq 0.35$  (en valor absoluto) representa generalmente correlación débil.
- Valores entre  $0.36 \leq r \leq 0.67$  (en valor absoluto) son considerados correlación moderada.
- Valores entre  $0.68 \leq r \leq 0.9$  (en valor absoluto) son considerados correlación alta.
- Valores de  $r \geq 0.9$  (en valor absoluto) son considerados correlación muy alta.

Si bien las correlaciones proporcionan una buena información sobre la relación lineal entre las simulaciones y observaciones, no toman en cuenta los desvíos (bias) que puedan estar presentes en las series de tiempo, por ello es necesario utilizar métodos complementarios que posibiliten identificar cuál de las parametrizaciones proporcionan mejores resultados (Wilks 2011).

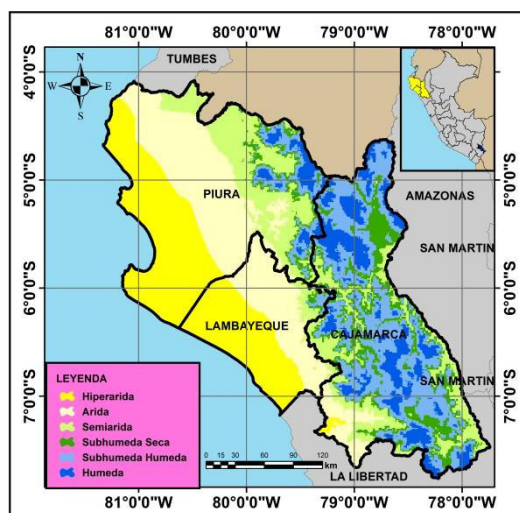
## ÁREA DE ESTUDIO, DATOS UTILIZADOS Y SOFTWARE

### 4.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la zona norte del Perú, en la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca, entre las coordenadas geográficas: 81.5° W a 77.5° W de longitud y 4° S a 8° S de latitud. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación del área de estudio y en la Figura 4.2 se muestra las zonas de aridez del suelo.



**Figura 4.1.** a) El área de estudio representado en amarillo (Elaboración propia). b) El modelo de elevación digital de la zona norte del Perú (Elaboración propia).  
(<http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/>) Fecha de acceso 12/2015.



**Figura 4.2.** Zonas de aridez del suelo, MINAM 2011 (Elaboración propia).

#### 4.1.1 Clima

En la región de Lambayeque, en condiciones normales, las escasas precipitaciones condicionan el carácter semidesértico y desértico de la angosta franja costera, por ello el clima de la zona se puede clasificar como desértico subtropical árido, influenciado directamente por la corriente fría marina de Humboldt, que actúa como elemento regulador de los fenómenos meteorológicos. La temperatura en verano fluctúa, según datos de la estación Reque, entre 25.6°C (diciembre) y 28.3°C (febrero), siendo la temperatura máxima anual promedio de 28.3°C (INDECI, 2004).

En la región de Piura, el clima es diversificado gracias a la amplia gama de pisos altitudinales y microclimas. En su espacio la variabilidad climática es seco en la costa con escasa presencia de lluvias, salvo en períodos de presencia del Fenómeno de El Niño. En la sierra, el clima es templado, se caracteriza por la sequedad de la atmósfera y el aumento del rango o amplitud térmica (temperaturas extremas), condiciones que varían con la altitud, latitud y geografía (PRPAD-Región Piura, 2005). Y también en la región hay años secos que origina al fenómeno de sequía, generando necesidades vitales de la población, desocupación y fuerte migración del campo hacia la ciudad, pérdidas de cultivos instalados y no instalados, disminución de los hatos ganaderos por presencia de enfermedades como la enterotoxemia y también desertificación por la escasez o falta de agua (PRPAD-Región Piura, 2005). En la costa, las temperaturas medias anuales son de 27° C en Piura y 25° C en



Talara. En las estaciones (Figura 4.5.) de Morropón y Chulucanas el promedio de temperatura máxima es de 31.6 ° C, la temperatura mínima es de 18.7 ° C (PRPAD-Región Piura, 2005). Para la parte alta de la vertiente del Pacífico, estación de Huarmaca (2100 m.s.n.m.) la temperatura promedio es de 14.6 ° C y las temperaturas máximas (20.1 a 20.7 ° C) en los meses de junio a septiembre debido a que durante estos meses la superficie recibe mayor insolación. Para la vertiente del Atlántico, estación de Huancabamba (1552 m.s.n.m.) el promedio de la temperatura máxima es de 18.8° C observándose en los meses de junio a septiembre los mayores valores (20.1 a 20.7 ° C), mientras que los valores promedios de la temperatura mínima oscilan entre 10.9 a 12.1° C. La humedad promedio anual es del 66%. (PRPAD-Región Piura, 2005).

En la región de Cajamarca, en forma general presenta un clima seco, templado y soleado durante el día y frío por las noches, con temperaturas que fluctúan entre 23° C cerca de la costa, 28° C en ceja de selva y 4° C en la sierra, la temporada de lluvias se extiende entre los meses de diciembre y abril, con precipitación de 200 a 1,500 mm. Presenta diversidad de climas, suelos, vegetación, distribuidos en cuatro ecorregiones (Figura 4.3.) (INDECI, 2005).

- Bosque Ecuatorial: Presenta un clima predominantemente cálido y seco; al Este se presenta un poco más fresco por el aumento de la altitud; hacia el norte es cálido y húmedo y hacia el sur seco. La temperatura promedio anual está entre los 23 y 24 °C. La precipitación varía de 500 mm. al norte a 100 mm. al sur, siendo la época de lluvias entre los meses de diciembre a marzo (INDECI, 2005).
- Páramo: En nuestro país, se ubica en la cima de las vertientes montañosas de los Andes del norte, aproximadamente entre 3000 y 3600 m. s. n. m., comprendiendo los departamentos de Piura y Cajamarca (área representativa “Santuario Nacional Tabaconas-Namballe”). El páramo se caracteriza por su clima frío y con mucha neblina, llegando a ocasionar lloviznas persistentes, que luego se acumulan y alimentan a las áreas depresionadas y lagunas. Los suelos presentan una gruesa capa de materia orgánica convirtiéndoles en un eficiente almacén natural y regulador del agua, es decir, rápida absorción del agua y un lento escurrimiento (MINAM, 2015).

- Puna: Presenta un clima muy frío, debido a la rarefacción atmosférica ocasionada por la altura. Por lo general las temperaturas son bajas, con variaciones muy marcadas de hasta 30°C entre las temperaturas diurnas y nocturnas. Existen dos estaciones muy marcadas en la puna. La época de lluvias (diciembre a marzo) y la época de seca (abril – noviembre) con presencia de lluvias en forma esporádica; en las zonas de mayor altura por encima de los 4,200 m.s.n.m. las precipitaciones se dan en forma de nieve y granizo. Los vientos son fuertes y soplan de manera continua, contribuyendo a reducir la temperatura y a secar el ambiente (INDECI, 2005).
- Selva Alta o de las Yungas: El clima en esta región se caracteriza por presentar una marcada variación de la temperatura, directamente relacionado con la altitud, siendo más cálido en la parte baja y templado en la parte alta. A los 500 de altura la temperatura promedio alcanza los 22°C, pero a los 3,500 metros desciende a los 4°C. Presenta un intenso régimen de lluvias que supera los 3,000 milímetros anuales, la presencia de lluvias es constante todo el año, con mayor incidencia durante los meses de Diciembre a Marzo. Otra característica de este clima es la presencia de una alta humedad ambiental, debido a la presencia de abundantes nubes bajas especialmente durante las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde (INDECI, 2005).

#### **4.1.2 Geomorfología**

En la región de Lambayeque, se puede distinguir tres terrazas geomorfológicas orientadas norte – sur. La primera terraza conformada por la línea de playas Eten - Pimentel; segunda terraza marina, donde se ubican las ciudades de la costa Eten, Mosefú, Sta. Rosa, Pimentel, Lambayeque, etc.; y la tercera terraza conformada por las Pampas de Reque (INDECI, 2004). La zona costera de Lambayeque está conformada por extensas pampas de material cuaternario y de algunos cerros o cadenas de cerros que sobresalen a los terrenos adyacentes. Un fenómeno en la Costa Norte, es la formación de dunas, originado por la acción del viento. Se han identificado dos grupos de depósitos eólicos de edades diferentes: Dunas Antiguas y Dunas Modernas (INDECI, 2004).



Figura 4.3. Ecorregiones (SIGMINAM 2011).

En la región de Piura, Morfológicamente está constituido por tres grandes unidades morfoestructurales las cuales son; la Cordillera Costera, las llanuras y depresiones costaneras y la cordillera Occidental. En base a ello, es que se ha originado los principales y grandes procesos geodinámicos que han ido formando el relieve a través de diferentes períodos geológicos. (ZEE - Región Piura, 2012).

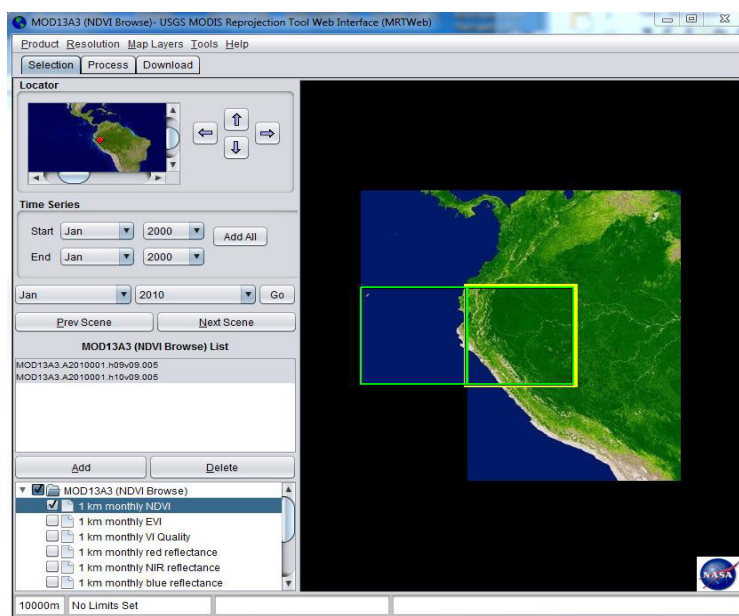
En la región de Cajamarca, presenta una gran diversidad ecológica con altitudes que van desde los 175 (Cerro Pitura-Contumazá) a 4,496 m.s.n.m. (Cerro Rumi Rumi-Cajabamba). Su territorio abarca parte de la vertiente occidental y oriental de los Andes. Entre los principales rasgos geomorfológicos del departamento destacan: al Oeste la Codillera Occidental; al Este el profundo cañón formado por el río Marañón; al Norte el sector Sur de la cordillera de El Cóndor; al Noreste la divisoria de aguas del Chinchipe con el Comaina y al Este y Noreste de la ciudad de Cajamarca (más de 3,000 m.s.n.m.) extensas jalcas o mesetas andinas poco accidentadas. La topografía del área central del departamento se caracteriza por la presencia de múltiples valles interandinos. Los principales valles del departamento son: Cajamarca, Jequetepeque, Condebamba, Chotano, Llaucano, Chamaya y Chinchipe. (GR-C; Gobierno Regional de Cajamarca, 2011)

## **4.2. DATOS UTILIZADOS**

### **4.2.1. NDVI – MODIS – TERRA**

El producto NDVI es uno de los índices de vegetación más ampliamente utilizados que se pueden obtener utilizando las bandas infrarrojo cercano (NIR) y rojo (R). Desde principios de la década de 1980, los investigadores han utilizado NDVI, que deriva del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo del satélite de la NOAA, para vigilar y evaluar el vigor de la vegetación terrestre (Tucker y D' Souza, 1996). El NDVI correspondió a los factores climáticos, como la precipitación y la temperatura, es utilizado para vigilar la sequía (Liu y Juarez, 2001; Wang et al., 2001.). Un sucesor de AVHRR, es MODIS a bordo del satélite TERRA fue lanzado en diciembre de 1999. MODIS tiene 36 bandas espectrales entre 0.405  $\mu\text{m}$  y 14.385  $\mu\text{m}$  y también se utiliza para producir imágenes de NDVI a 250 m, 500 m y 1000 m de resolución espacial (Gallo et al.,

2004). En el presente trabajo, el producto NDVI mensual proporcionada por MODIS - TERRA con resolución espacial de 1 km (MOD13A3) ha sido descargado de la observación de la puerta de enlace de datos del sistema de tierra para el período de marzo del 2000 a diciembre del 2013. Los mosaicos de h09v09 y h10v09, (Figura 4.4.) que cubre el área de estudio, se volvió a proyectarse desde una sinusoidal a una proyección igual de área cónico de Albers, mediante un operador de remuestreo bilineal en herramienta de reproyección MODIS (MRT) de la página web (<http://edcdaac.usgs.gov/main.asp>).



**Figura 4.4.** MRTWeb (<http://mrtweb.cr.usgs.gov>) Fecha de acceso 01/2014.

#### 4.2.2. TSS – MODIS – TERRA

Los productos TSS-MODIS que se crean como una secuencia de productos que comienzan con una franja (escena) y progresan, a través de transformaciones espaciales y temporales, para todos los días, de ocho días y los productos reticulados globales mensuales, utilizando un algoritmo desarrollado por Wan y Dozier (1996). Los productos TSS implementan correcciones atmosféricas de gases, la dispersión de partículas de aerosoles y cirros delgados y eliminar el ruido de la nube de manera eficaz. En el presente trabajo, MODIS - TERRA de ocho días, el TSS con resolución de 1 km (MOD11A2) de marzo del 2000 a diciembre del 2013 ha sido descargado de la misma página del MRTWeb como el NDVI.

De conformidad con la resolución temporal (mensual) del NDVI, para obtener el valor mensual del TSS se calcularon haciendo una ponderación que pertenecen a cada mes en base a ocho días proporcionado los metadatos del TSS después de enmascarar el llenado y los valores perdidos (Rhee et al. , 2010). El proceso se terminó en el lenguaje interactivo data/entorno para la visualización de imágenes del entorno de software (IDL/ENVI).

#### **4.2.3. Precipitación – radar de precipitación (PR) – TRMM**

La misión de medición de lluvias tropicales (TRMM, por sus siglas en ingles es Tropical Rainfall Measuring Mission) es una misión conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) para estudiar las lluvias en los trópicos y cuyas mediciones son consideradas la fuente más confiable de datos de precipitación a nivel global (Pauluis et al., 2012). Los objetivos del TRMM son para medir la precipitación tropical y subtropical y estimar su intercambio de energía asociada. Una serie de sensores relacionados con las precipitaciones, como el radar de precipitación (PR), el generador de imágenes de microondas TRMM (TMI) y el sistema de radiómetro visible e infrarroja (VIRS) se encuentran a bordo del satélite TRMM (Kummerow et al., 1998;. Almazroui, 2011). Con base en datos del TRMM, un producto de nivel 3, 3B43, fue producido por Global Climatología de las Precipitaciones Center (GPCC) usando el algoritmo de Huffman (Huffman et al., 1995, 1997). El 3B43 contiene los índices de precipitación (mm/h) para cada mes en 0.25°×0,25° Resolución y cobertura espacial se extiende desde 50° S a 50° N en global. En el presente trabajo, los datos de precipitación del TRMM 3B43 de marzo del 2000 a diciembre del 2013ha sido descargado de Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>) (Fecha de acceso 03/2014) y un nuevo muestreo a resolución de 1 km utilizando una misma proyección como NDVI.

#### **4.2.4. Datos *in-situ***

##### **4.2.4.1. Datos de precipitación mensual**

Los datos de precipitación mensual se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú del periodo de 1970 hasta 2013 (<http://www.senamhi.gob.pe/>) (Fecha de acceso 05/2015). Para los departamentos de Piura, Lambayeque y Cajamarca, en el área de estudio, se seleccionó a un total de 65 estaciones meteorológicas que cuentan con más del 80% de información de datos históricos (Tabla. 4.1), para el cálculo del IPE se usó toda la serie histórica y para la validación con los indicadores se seleccionó de marzo de 2000 a diciembre del 2013 (Anexo D).

En la región Piura hay 21 estaciones meteorológicas, la región Lambayeque hay 10 estaciones meteorológicas y la región Cajamarca hay 34 estaciones meteorológicas en toda el área de estudio (Figura. 4.5.). De igual manera las estaciones meteorológicas para cada zona de índice de aridez, en la zona hiperárida hay 8 estaciones meteorológicas, la zona árida hay 11 estaciones meteorológicas, en la zona semiárida hay 14 estaciones meteorológicas, en la zona subhúmeda seca hay 7 estaciones meteorológicas, en la zona subhúmeda húmeda hay 20 estaciones meteorológicas y en la zona húmeda hay 5 estaciones meteorológicas que están distribuidas en la región de Piura, Lambayeque y Cajamarca (Figura 4.6.).

Índice de Aridez	Departamento	Estación	Índice de Aridez	Departamento	Estación
Hiperárido	LAMBAYEQUE	Cerro de Arena	Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	Contumaza
Hiperárido	LAMBAYEQUE	Lambayeque	Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	Llapa
Hiperárido	LAMBAYEQUE	Pimentel	Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	Namora
Hiperárido	PIURA	Bernal	Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	Puente Chunchuca
Hiperárido	PIURA	Chusis	Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	San Marcos
Hiperárido	PIURA	La Esperanza	Subhúmedo Seco	PIURA	Santo Domingo
Hiperárido	PIURA	Miraflores	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Bambamarca
Hiperárido	PIURA	San Miguel	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Cachachi
Árido	CAJAMARCA	Chilete	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Cajabamba
Árido	CAJAMARCA	Las Paltas	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Chancay Baños
Árido	LAMBAYEQUE	Bebedero	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Chota
Árido	LAMBAYEQUE	Oyotun	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Chugur
Árido	LAMBAYEQUE	Pañala	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Conchan
Árido	LAMBAYEQUE	Pasaje Sur	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Cospan
Árido	LAMBAYEQUE	Tinajones	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Hacienda Negritos
Árido	LAMBAYEQUE	Virrey	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Namballe
Árido	PIURA	Lancones	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Niepos
Árido	PIURA	Mallares	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Pimpingos
Árido	PIURA	Pananga	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Quilcate
Semiárido	CAJAMARCA	Augusto Weberbauer	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	San Jose del Alto
Semiárido	CAJAMARCA	El Arenal	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	San Juan
Semiárido	CAJAMARCA	Laguna Compuertas	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Tocmoche
Semiárido	CAJAMARCA	Lives	Subhúmedo Húmedo	CAJAMARCA	Udima
Semiárido	CAJAMARCA	Magdalena	Subhúmedo Húmedo	PIURA	Chalaco
Semiárido	CAJAMARCA	San Benito	Subhúmedo Húmedo	PIURA	Hacienda Shumaya
Semiárido	LAMBAYEQUE	Incahuasi	Subhúmedo Húmedo	PIURA	Huarmaca
Semiárido	PIURA	Hacienda Bigote	Húmeda	CAJAMARCA	Chontali
Semiárido	PIURA	Huancabamba	Húmeda	CAJAMARCA	Granja Porcon
Semiárido	PIURA	Morropon	Húmeda	CAJAMARCA	Hualgayoc
Semiárido	PIURA	Sapillica	Húmeda	PIURA	Ayabaca
Semiárido	PIURA	Sausal de Culucan	Húmeda	PIURA	Tacalpo
Semiárido	PIURA	Sondorillo	<b>Tabla 4.1</b> Estaciones meteorológicas del SENAMHI para las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca del 1970 – 2013 (Elaboración propia).		
Semiárido	PIURA	Vado Grande			
Subhúmedo Seco	CAJAMARCA	Asuncion			



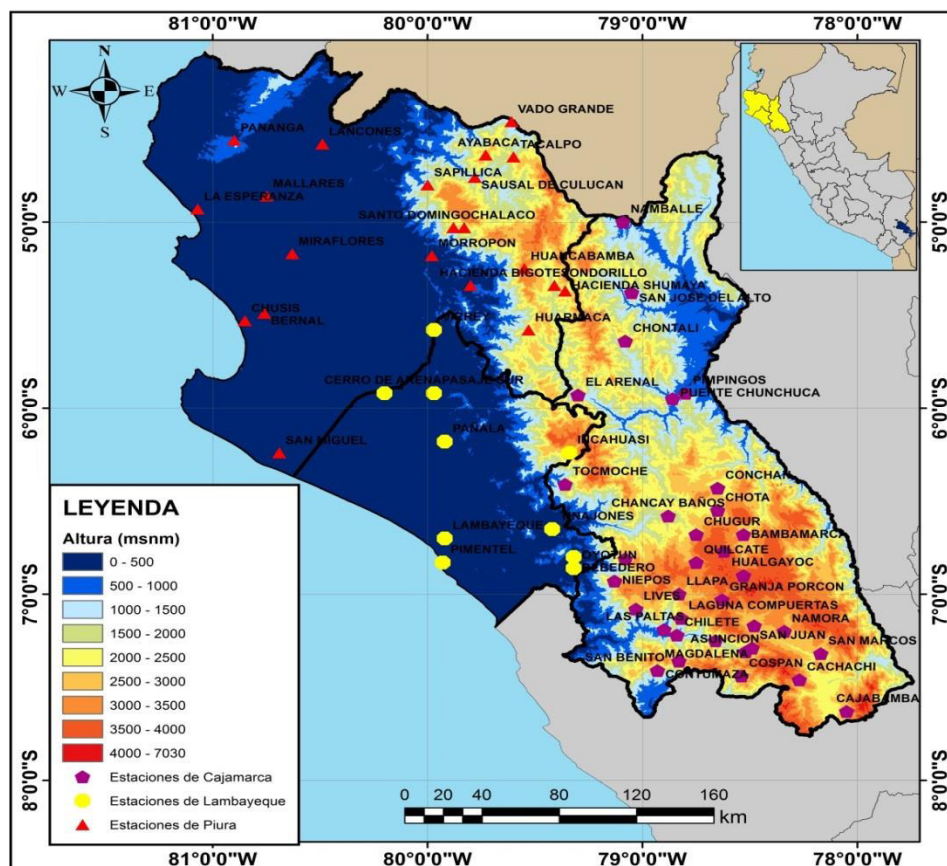


Figura 4.5. Estaciones meteorológicas del área de estudio. Facilitados por el SENAMHI.

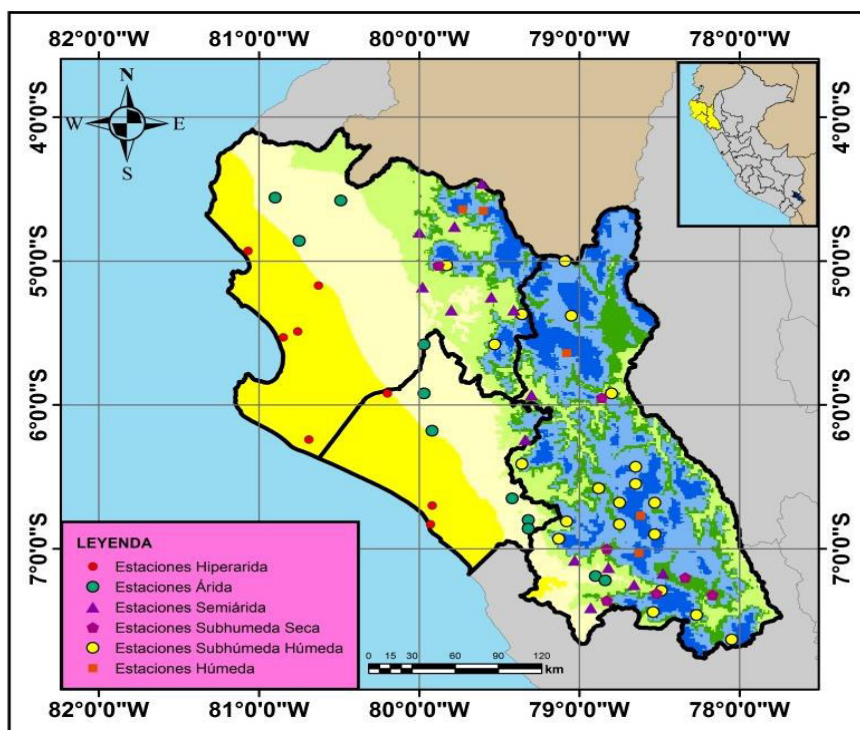
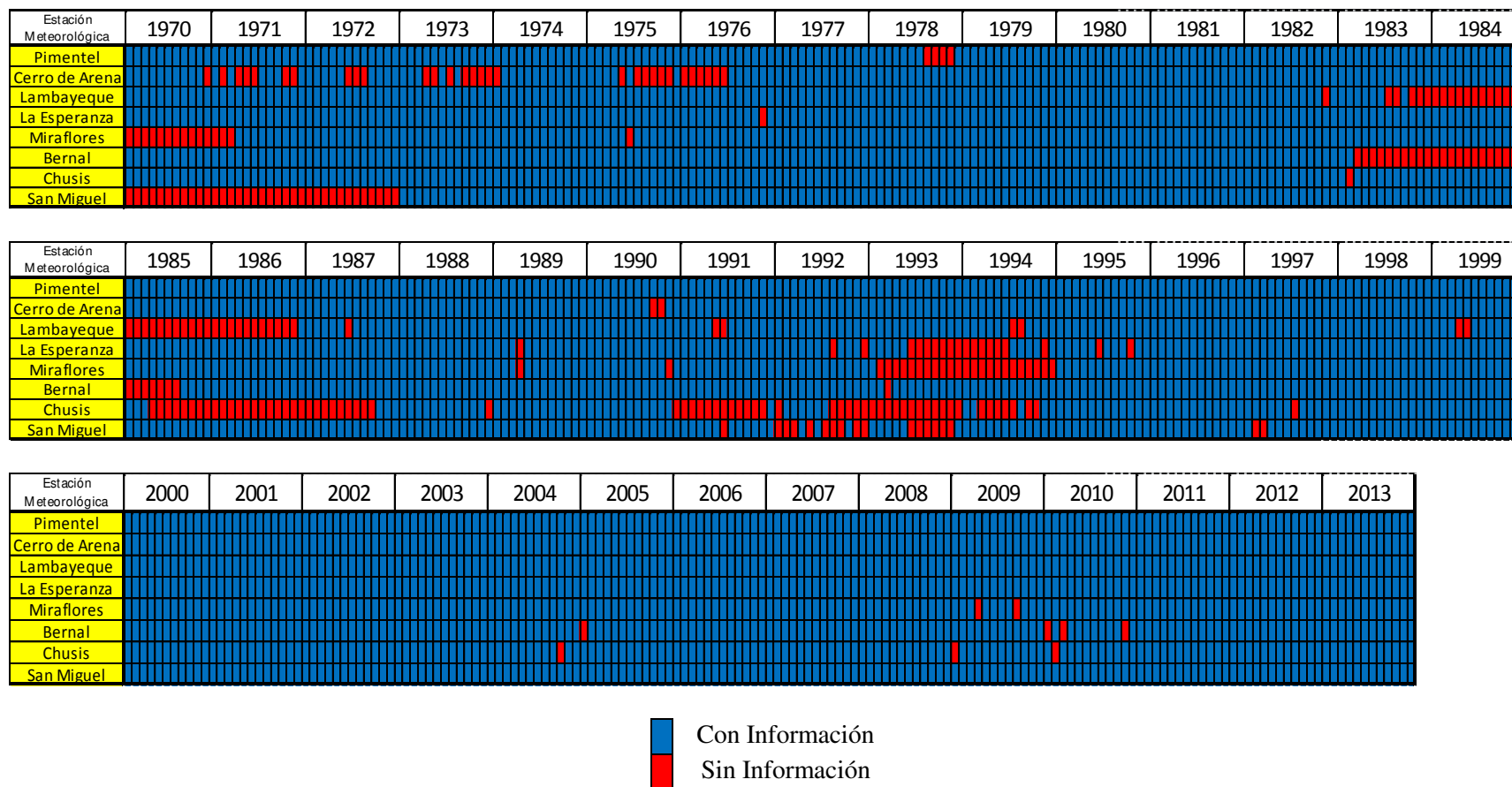
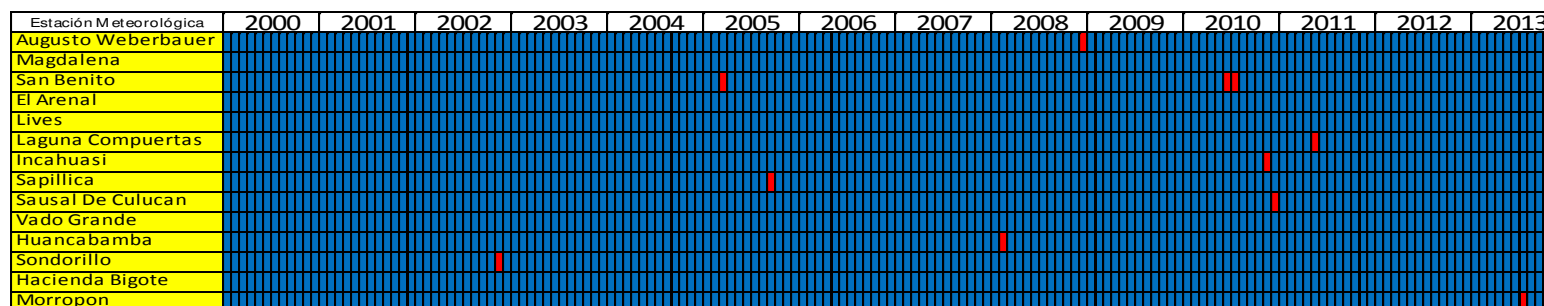
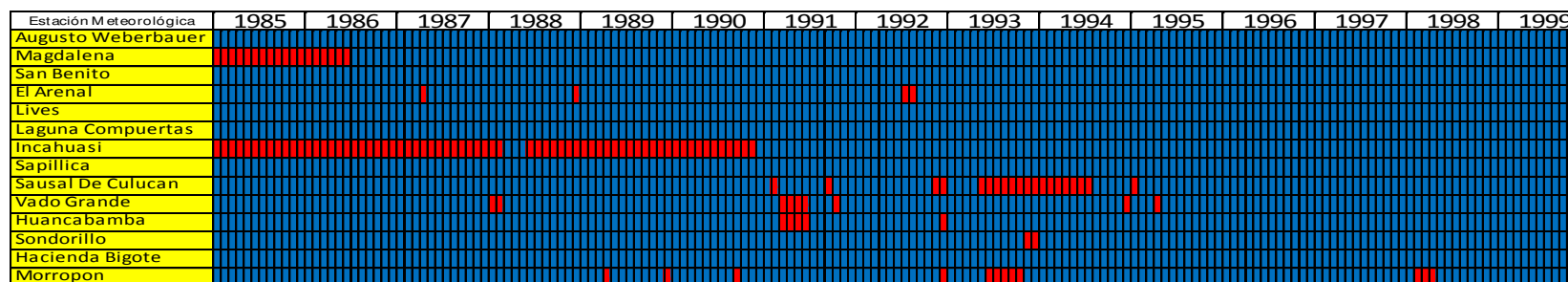
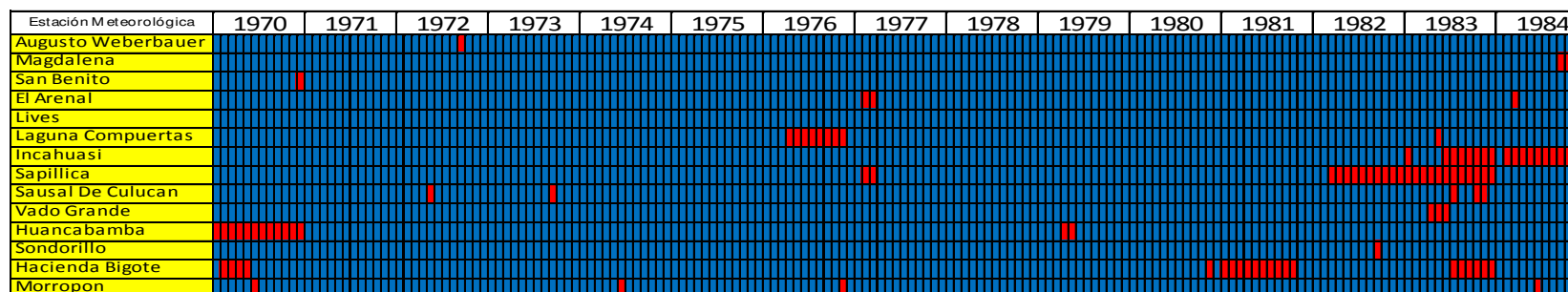




Figura 4.6. Estaciones meteorológicas del área de estudio para cada zona de aridez. Facilitados por el SENAMHI.



**Figura 4.7.** Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona hiperárida de 1970 al 2013 (Elaboración propia).

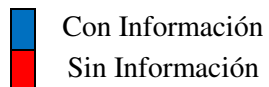
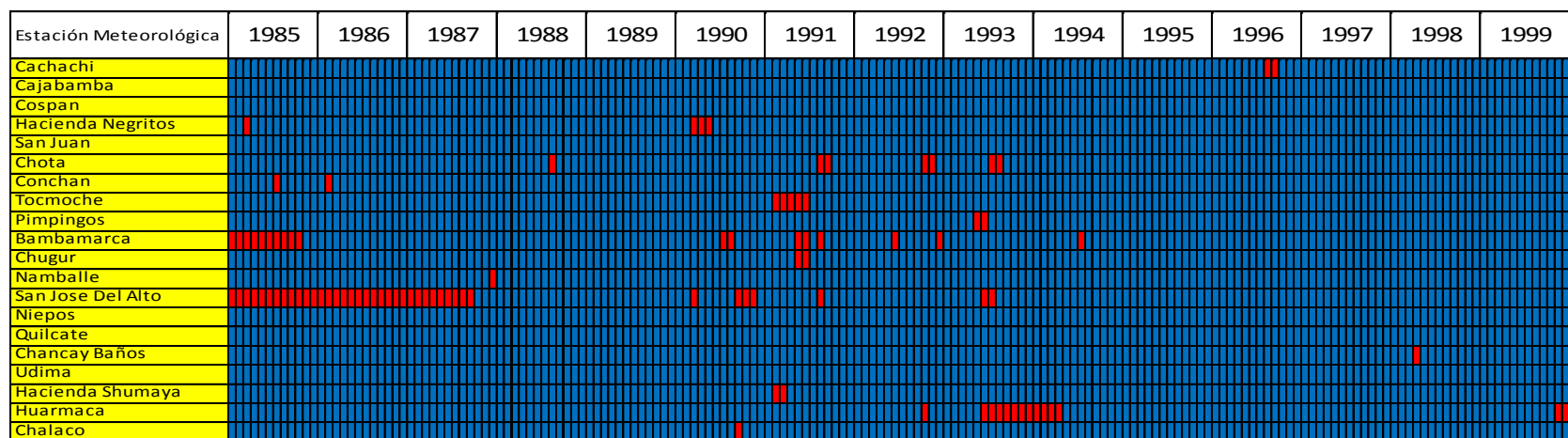
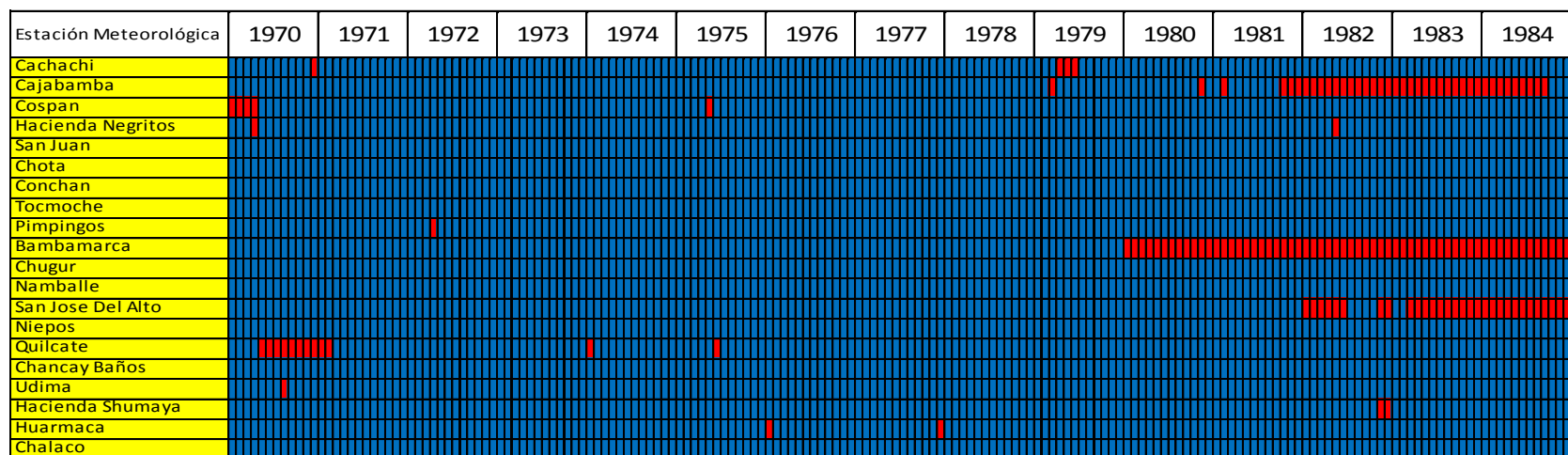




 Con Información  
 Sin Información

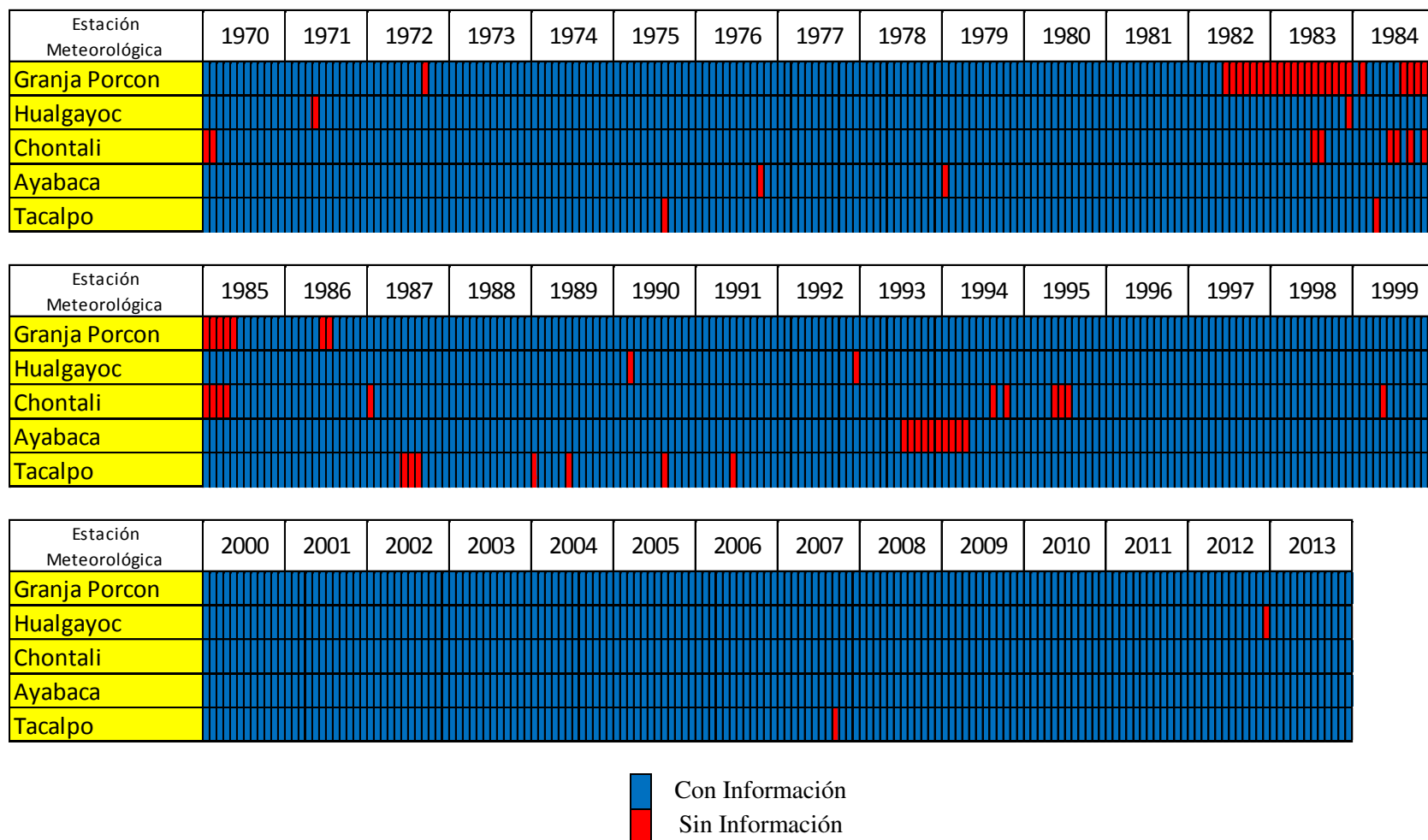
**Figura 4.9.** Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona semiárida de 1970 al 2013 (Elaboración propia).





**Figura 4.11.** Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona subhúmeda húmeda de 1970 al 1999 (Elaboración propia).





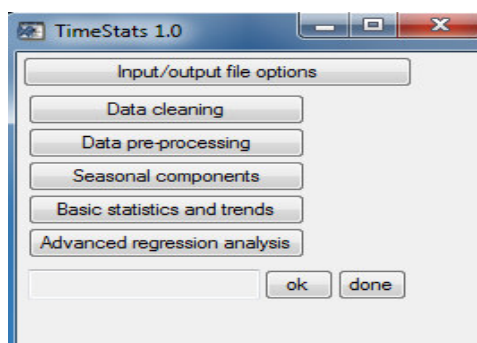
**Figura 4.13.** Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona húmeda de 1970 al 2013 (Elaboración propia).



## 4.3. SOFTWARE

### 4.3.1. Módulo TIMESTATS V1.0.

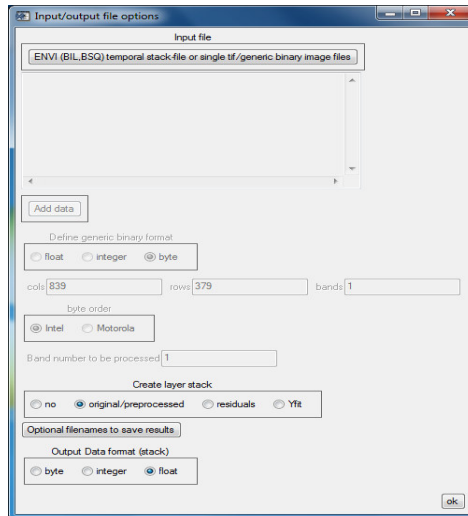
El “TimeStats V1.0” es útil para procesar la serie de tiempo mensual del NDVI del sensor MODIS. Hay 6 módulos básicos, se describen a continuación ya que proporcionan métodos comunes para la data de pre-procesamiento y análisis estadístico, se muestra en la Figura 4.14. para nuestro caso estudio se uso los dos primeros módulos:



**Figura 4.14.** Ventana del entorno de trabajo del TimeStats muestra los 6 módulos.

#### 4.3.1.1. Módulo “Input/output file options”

El TimeStats, acepta imagenes en tres dimensiones como archivos de entrada, donde las columnas y filas es la dimension de la imagen y las bandas de las imagenes representa el eje de tiempo (discreto) los formatos de archivo reconocidos en el ENVI son BIL (banda intercalado) o BSQ (Banda Secuencial) y TIFF. La ventana controla varios parámetros, crea un apilado de la data original/preprocesada, se genera en formato de salida float y por defecto, todos los archivos de salida se guardan en la carpeta de trabajo.



**Figura 4.15.** Input/output file options ingresa el archivo en TIFF y los archivos de salida se guardan en la carpeta de trabajo.

#### 4.3.1.2. Módulo “Data Cleaning”

La limpieza de los datos es de gran importancia para el análisis de series de tiempo, ya que los datos reales pueden ser incompletos, ruidosos e inconsistentes. TimeStats proporciona herramientas de limpieza de datos basadas en píxeles para dar cuenta de los datos que faltan, los valores extremos, y los datos ruidosos.

##### *a) Missing value:*

Los datos marcados como valores perdidos por un código de valor perdido en una sola serie de tiempo puede ser excluidas del análisis adicional u opcionalmente sustituido por:

- El promedio total de la serie temporal
- El promedio estacional (por ejemplo, un promedio a largo plazo de un mes determinado).
- La interpolación lineal temporalmente de los valores de los datos vecino (válido).

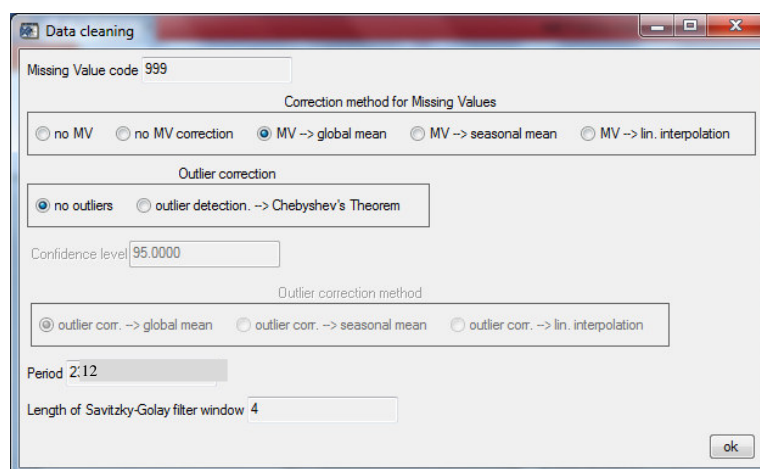
En la opción *Periodo* especifica la longitud de un punto (en nuestro caso son 12 meses). Si no hay corrección de valor que falta se pretende un indicador que se puede ajustar en las estadísticas básicas y módulo de tendencia para registrar el número de puntos válidos en cada serie.

### ***b) Outliers***

Tienen valores inusualmente en relación con los otros datos se refieren como valor atípico. TimeStats hace uso del *teorema de Chebyshev* para la detección de valores atípicos, que establece que una variable aleatoria se enfrentará a un valor dentro de  $k$  desviaciones estándar de la media con una probabilidad de al menos  $1 - (1/k^2)$  (Lohninger, 1999). En el TimeStats los límites de datos relacionados parámetro  $k$  y se determinan de acuerdo con un nivel de confianza definido por el usuario (por ejemplo, 99%). detección de las demás debe llevarse a cabo con cierto cuidado. Los valores extremos pueden ser reemplazados utilizando las mismas técnicas que ya descritas para los valores que faltan.

### ***c) Noisy data***

Otra fuente de no uniformidad es el ruido que introduce componentes de alta frecuencia en los datos. Serie ruidosa se puede suavizar en TimeStats utilizando el filtro Savitzky-Golay (rutina de librería IDL *savgol*, Savitzky y Golay, 1964), que se aproxima a la serie mediante la ventana de mínimos cuadrados de polinomios en forma y que conserva los momentos de orden superior de la serie. TimeStats generalmente utiliza un polinomio de segundo orden, mientras que el tamaño de la ventana es seleccionable por el usuario (Figura 4.16.). En la presente tesis se usó el tamaño de la ventana 4 para la serie del NDVI. Para información más detallada revisar “*User Manual TimeStats V1.0*”.



**Figura 4.16.** Procesando el NDVI – MODIS usando el TimeStats para la limpieza de los datos

### METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

#### 5.1. Metodología

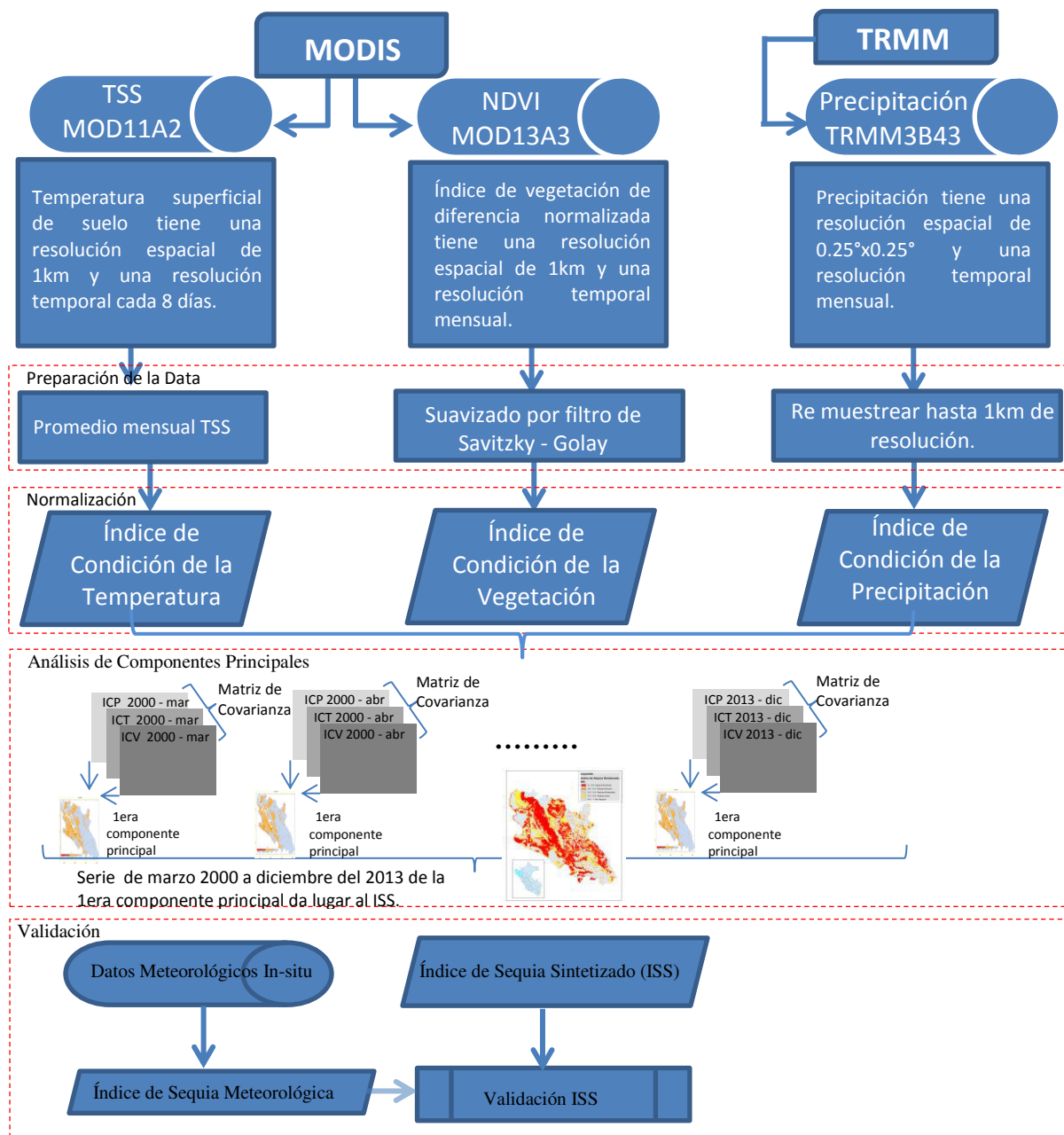
Esta investigación tiene como objetivo analizar los índices de sequía generados mediante los productos NDVI, TSS y la precipitación del TRMM satelitales para las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca. Pero diferentes datos satelitales no pueden compararse y sintetizarse directamente entre sí. Por lo tanto, las múltiples fuentes de imágenes satelitales se deben escalar y deducir a una serie de parámetros de sequía. En la Figura. 5.1. Se muestra el diagrama de flujo del presente trabajo de tesis.

#### 5.2. Procesamiento de los productos

Los productos NDVI – MODIS y TSS - MODIS (10:30 AM) del nivel 5 de procesamiento mediante el software MRTweb (MODIS Reprojection Tools), georreferenciando en la proyección Geográfica y datum WGS84. La extensión de los productos MOD11 y MOD13 distribuido por la NASA corresponde a 5 minutos de observación del sensor. Los productos NDVI y TSS del MODIS-Terra se identifican de manera estándar con el prefijo “MOD”.

Se dispone el producto TSS diurna con una resolución espacial de  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  y promedio de 8 días, para el periodo de estudio marzo 2000 a diciembre 2013.

Se trabajó con 634 imágenes TSS-MOD11, 46 productos por año, mientras que en los meses esto varía; si el año es bisiesto (366 días) para los meses de mayo y noviembre se dispone de tres productos MOD11 y para el resto están disponibles 4 productos TSS-MOD11. Si el año tiene 365 días, para los meses de abril y octubre hay tres productos MOD11 y cuatro productos MOD11 para cada mes restante.



**Figura 5.1.** Metodología (Adaptado de Du et al., 2013).

Se dispone el producto NDVI – MODIS a una resolución espacial de  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  y resolución temporal mensual, para el periodo marzo del 2000 a diciembre del 2013. Se trabajó con 167 imágenes NDVI-MOD13, 12 productos por año, mientras en el 2000 se dispone de 11 productos MOD13.

También, se dispone los datos de precipitación estimada por el sensor activo radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM-3B43 a una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ \approx 25\text{km} \times 25\text{km}$  y resolución temporal mensual, para el periodo marzo del 2000 a diciembre del 2013. Se trabajó con 168 imágenes de precipitación – TRMM-3B43, 12 datos de precipitación por año.

En este estudio se utiliza datos de precipitación mensual desde el año 1970 hasta 2013 proporcionados por el SENAMHI en la región de Piura hay 21 estaciones meteorológicas, en la región de Lambayeque hay 10 estaciones meteorológicas, en la región de Cajamarca hay 34 estaciones meteorológicas. Siendo un total de 65 estaciones meteorológicas en la cual obtendremos los índices de precipitación estandarizado (IPE) nos servirá para evaluar con los índices de sequía, Los datos de precipitación antes de realizar el cálculo del IPE han seguido un tratamiento ver (Anexo D).

Dado el elevado número de imágenes para el procesamiento de los productos, se han diseñado algoritmos en lenguaje IDL (Interactive Data Language) para la automatización de los procesos. Los algoritmos utilizan funciones propias de IDL y también funciones de procesamiento de ENVI para la aplicación del análisis de componentes principales (ACP) y la generación de los mapas temáticos.

### **5.2.1. Preparación de los productos**

Las imágenes NDVI y TSS del sensor MODIS cada una de estas imágenes tienen a una resolución espacial de 1 km, la TSS promedio de 8 días. Para conseguir la transformación en Kelvin para luego convertir a Celcius, se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$T_C = (T_K * f_s) - 273.15 \quad (5.1)$$

Donde:

$T_C$ : Temperatura superficial del suelo en grados Celsius,

$T_K$ : Temperatura superficial del suelo en grados Kelvin,

$f_s$ : Es el factor de escalado requerido en la transformación de datos tipo entero a datos tipo real y  $-273.15$  es el valor de transformación de la temperatura de  $K$  a  $^{\circ}C$ .

Una vez hecha la transformación a grados Kelvin, se procede a calcular los promedios mensuales de la temperatura de la superficie del suelo diurna.

Para el NDVI se usó específicamente el modulo “TimeStats” para hacer la limpieza de los datos y el suavizado.

Finalmente la precipitación del TRMM 3B43 son mensuales y su resolución espacial es  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ} \approx 25km \times 25km$ , en este caso se realizó un re-muestreo a 1km de resolución espacial con una interpolación bilineal y usando la misma proyección como el NDVI.

#### **5.2.1.1. Módulo TIMESTATS V1.0.**

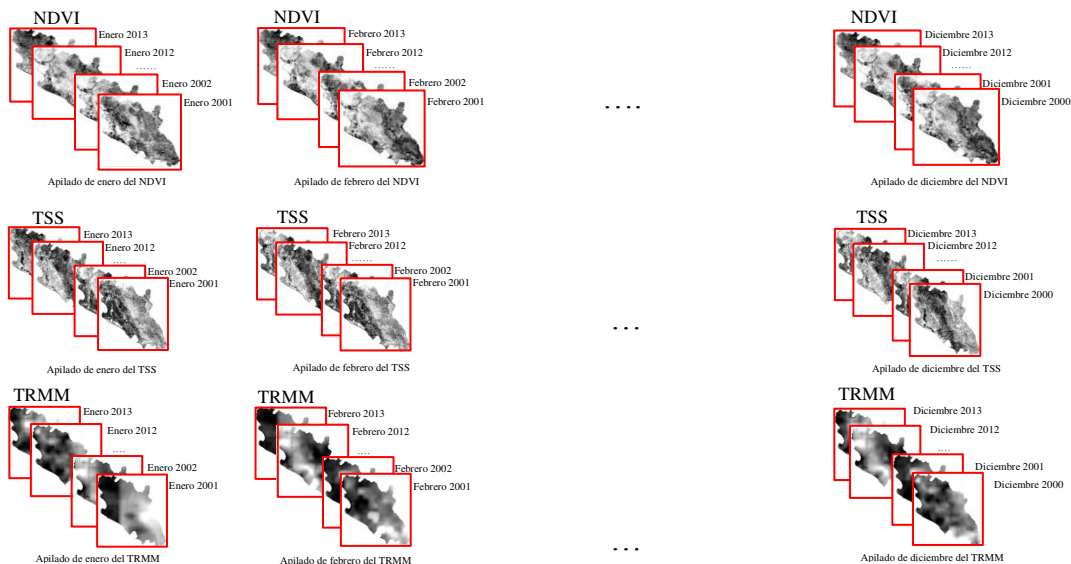
A continuación se enumera los pasos a seguir para la limpieza de los datos de la serie de tiempo NDVI-MODIS usando el módulo de TIMESTATS V1.0., ver la Figura 4.14 y la Figura 4.15 de la sección anterior.

1. Apilar la serie del NDVI desde marzo del 2000 a diciembre del 2013 y guardar en formato TIFF en el programa de ENVI 5.2.
2. Abrir el TimeStats, seleccionar el 1er modulo *Input/output file options* e ingresar el archivo en formato TIFF.
3. Seleccionar la serie apilada del NDVI – MODIS desde marzo del 2000 hasta diciembre del 2013.
4. Seleccionar en Create layer stack la opcion original/preprocessed.
5. Luego establecer el formato de salida que se desea utilizar al convertir los datos. Existen tres metodos: a) byte b) *Integer* c) *Float*. Para nuestro caso los valores de los pixeles están en float por tanto se eligió la letra c).
6. Dar Ok.
7. Seleccionar el 2do módulo *Data cleaning* en la 1era opción de valores perdidos por defecto aparece 999 se deja tal como está.

8. De la 2da opción método de corrección para valores perdidos seleccionamos el promedio total de la serie.
9. De la 3era opción seleccionar no hay valores atípicos,
10. De la 4ta opción periodo colocar 12 meses.
11. De la 5ta opción el tamaño de la ventana del filtro Savitzky-Golay en nuestro caso se colocó el valor de 4 o puede ser cualquier otro valor, solo cambia el tamaño de la ventana ya que el grado del polinomio de Savitzky-Golay es de grado 2.
12. Dar Ok.
13. Dar Ok y los archivos de salida se guardan en la carpeta de trabajo.

### 5.2.2. Normalización y análisis de componentes principales

Los productos de TSS, NDVI y precipitación del TRMM tienen la misma resolución espacial de 1km y resolución temporal mensual, apilar todos los eneros y los febreros desde el 2001 al 2013, luego todos los marzos, abril y así hasta diciembre también desde el 2000 al 2013 para TSS, NDVI y precipitación/TRMM. En la Figura 5.2., se presenta un ejemplo.

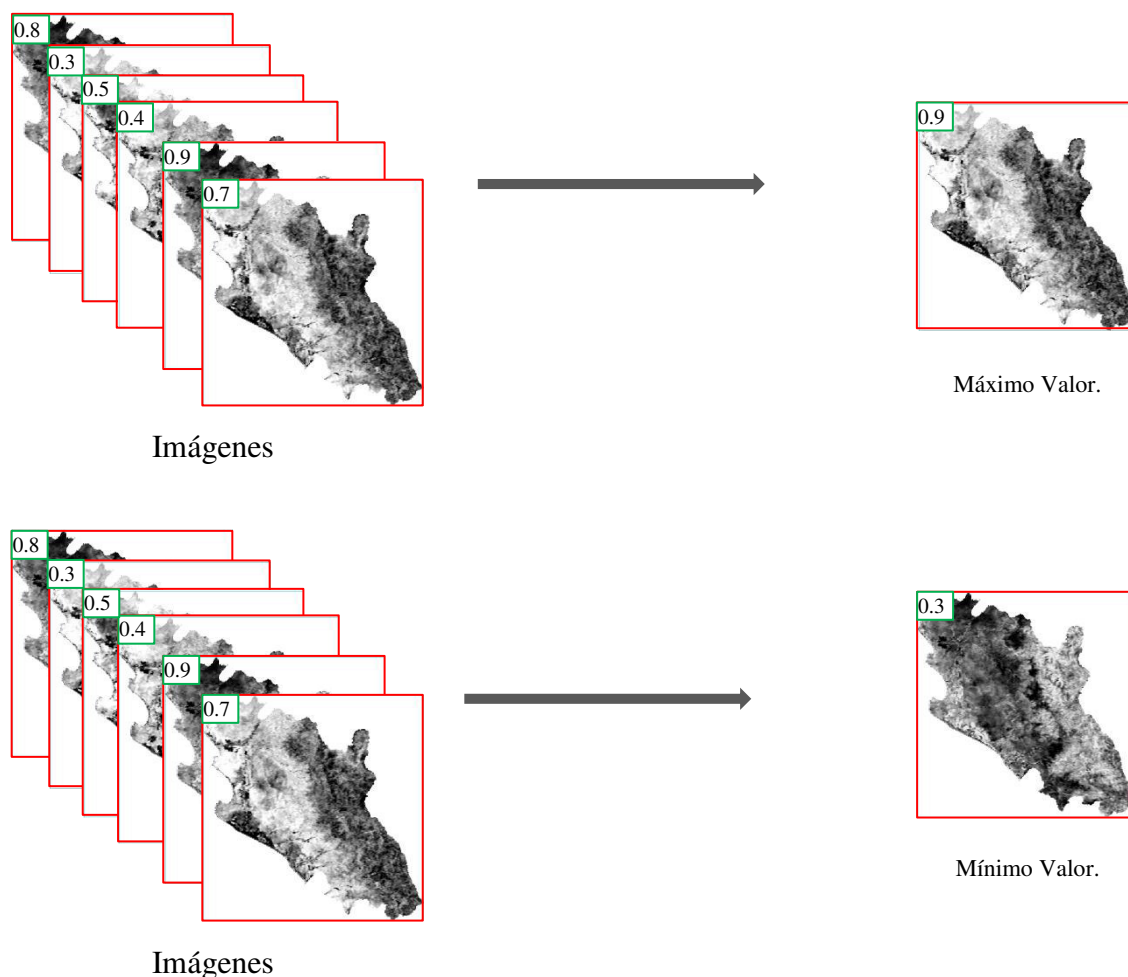


**Figura 5.2.** Apilado por mes la TSS, el NDVI y la precipitación/TRMM para el área de estudio (Elaboración propia).



### 5.2.2.1 Máximo valor y mínimo valor de las imágenes

La técnica de los máximos valor y mínimos valor consiste en seleccionar el mayor y el menor valor numérico de un pixel dado, en diferentes fechas. En la Figura 5.3 se presenta un ejemplo para ambos casos (Bai et al., 2005).



**Figura 5.3.** Ejemplo del máximo valor y mínimo valor de las imágenes (Elaboración propia).

### 5.2.2.2 Cálculo de los indicadores de sequía

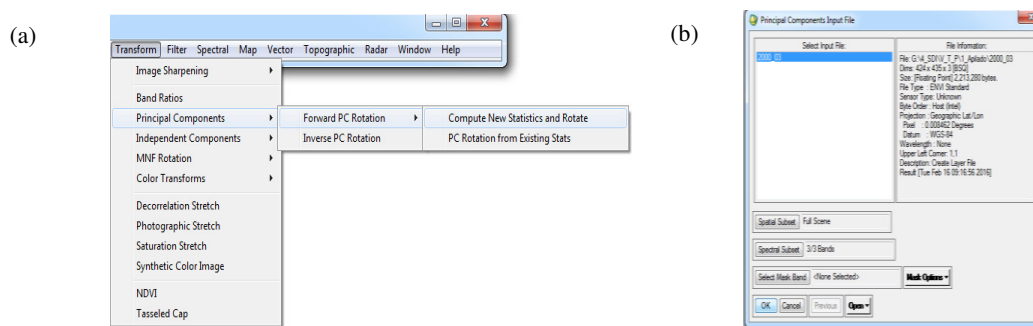
La técnica de máximo valor y mínimo valor se aplica para la TSS, NDVI y precipitación/TRMM que fueron agrupados como en la Figura 5.2. Para luego proceder al cálculo de los indicadores de sequía como el ICV, ICT e ICP como se mencionó en la sección 3.1.

### 5.2.2.3 Análisis de componentes principales

El procedimiento del análisis de componentes principales calcula *en primer lugar* la matriz covarianza y los valores propios, vectores propios entre todos los datos de entrada, *en segundo lugar*, obtiene el porcentaje de varianza explicada establecidos por cada componente de datos totales y *finalmente*, una serie de nuevos datos (llamada componentes) se calcula multiplicando el vector propio a los datos de entrada originales (Lasaponara, 2006).

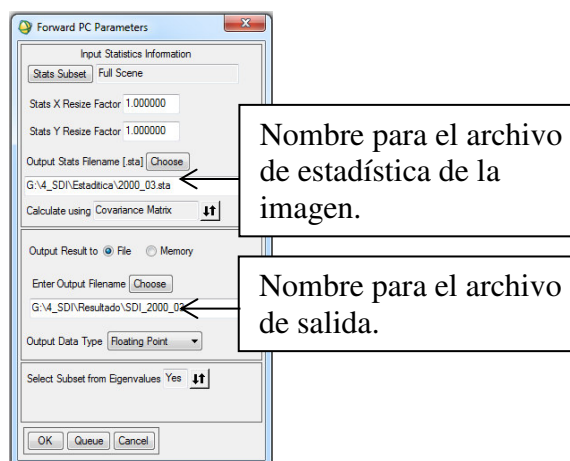
#### \* Proceso de obtención de las componentes principales

En el ENVI 5.1 del menú principal “Transform”, se ingresa a “Principal Components” y en “Forward Pc Rotation” se indica que genere las estadísticas ver Figura 5.4.:



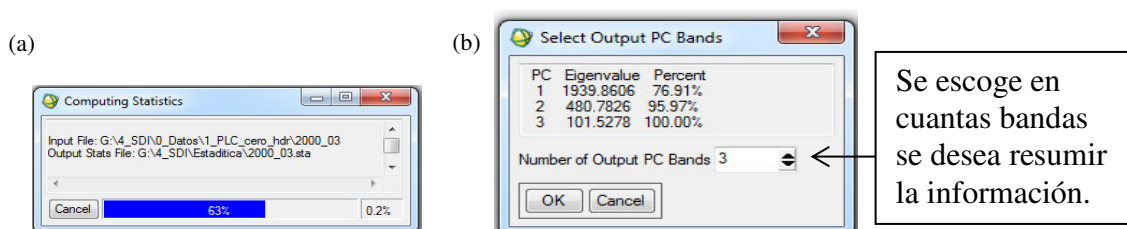
**Figura 5.4.** (a) La opción de análisis de componentes principales (b) Seleccionamos la imagen apilada de un mes que contiene ICV, ICT e ICP (Elaboración propia).

Posteriormente, se debe dar un nombre de salida a las estadísticas, así como a la imagen resultante como se muestra en la Figura 5.5 siguiente:



**Figura 5.5.** Ventana de entorno de trabajo del análisis de componentes principales. Los diversos campos se llenan y se designa donde guardar la salida a las estadísticas y la imagen resultante como se muestra.

Dar ok y comienza el proceso:



**Figura 5.6.** (a) Procesamiento del análisis de componentes principales usando la estadística del ENVI 5.1. (b) Se obtiene el porcentaje de varianza explicada establecidos por cada componente de datos totales y se escoge el número de bandas que se desea resumir la información, en la presente tesis se usó la primera componente y tiene más del 75% de información, luego dar ok.

En las aplicaciones de teledetección, el análisis de componentes principales (ACP) se ha usado como una herramienta de compresión de datos, descartando componentes menores con pequeños valores explicativos. Aunque ICV, ICT e ICP pueden ser utilizados para vigilar la sequía en el aspecto de la vegetación, el suelo y el clima, respectivamente, hay información correlacionada entre ellos para vigilar la sequía integral. Además, la contribución del ICV, ICT e ICP para la vigilancia de la sequía no tiene una relación lineal en las diferentes estaciones. Por ejemplo, si las demás condiciones son casi normales, la vegetación puede ser más sensible a la humedad durante la formación del dosel (aparición de hojas) y para la temperatura durante la floración (Du et al., 2013). Por lo tanto, en el presente trabajo, el análisis de componentes principales (ACP) se utilizó para obtener la principal información del ICV, ICT e ICP y se descartar la correlación entre ellos. La transformación de componentes principales se realizó en el software ENVI. El ICV, ICT e ICP de cada mes se introducen como bandas espectrales originales y se calculan el mismo número de bandas de las componentes principales (Du et al., 2013). El primer componente principal (CP1) contiene información más del 75 % de las tres bandas ICV, ICT e ICP de marzo 2000 y así para cada mes hasta diciembre 2013, el CP1 se define como un nuevo índice de sequía, es decir, el índice de sequía sintetizado (ISS) Figura 6.6. (Du et al., 2013). Basado en el método de ACP, se ha producido un conjunto de datos del ISS desde marzo del 2000 hasta diciembre del 2013. El ISS también se divide en cinco clases (Tabla 2.4). Con el desarrollo del conjunto de datos de validación, los esquemas de clasificación podrían ser revisadas en base a nuevos estudios.

### **5.3. Evaluación del índice de sequía sintetizado con el índice de precipitación estandarizado (IPE)**

El IPE, desarrollado por McKee et al. (1993, 1995), sólo se basa en los datos de precipitación in situ y como mínimo se debe contar con 30 años de información, y ser independiente de la magnitud de la precipitación media y por lo tanto es comparable a lo largo de una gama de zonas climáticas. El IPE es definido por la diferencia entre la precipitación total mensual histórica y su media estacional a largo plazo entre la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Una de las ventajas significativas de la IPE es que se puede calcular para diferentes escalas de tiempo para vigilar las sequías meteorológicas con respecto al inicio, gravedad, duración, extensión y final. La serie de tiempo IPE de las 65 estaciones meteorológicas pertenecientes a las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca durante 1970-2013, se ha calculado utilizando los datos de precipitación mensual total in situ y para la validación del ISS se utilizó el IPE durante 2000-2013. Dado que la influencia de la sequía sobre la vegetación tiene alrededor de 3 meses de desfase en zonas subhúmedas secas y semiáridas (Udelhoven et al., 2009), una escala de 3 meses IPE (IPE3) se calculó en este trabajo. IPE3 refleja las condiciones de humedad mediano plazo y proporciona una estimación estacional de la precipitación. Por lo tanto, es más adecuado en comparación con la media del ISS en las zonas árida, semiáridas y subhúmeda secas clasificadas de acuerdo al índices de aridez. El mapa temático del ISS obtenido a partir de los productos se promedió espacialmente para cada clasificación del índice de aridez y se utilizó para llevar a cabo análisis de correlación con el promedio del IPE3 que se calculó a partir de la estación meteorológica correspondiente a cada zona de índice de aridez.

La evaluación de los índices ICV, ICT e ICP proporcionado por el sensor MODIS y el satélite TRMM con el IPE3 para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca, se realizó mediante regresión lineal simple. Como buen ajuste del modelo se ha utilizado el coeficiente de correlación lineal de Pearson.

### RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los productos NDVI (10:30 a.m.), temperatura superficial del suelo diurna (10:30 a.m.) procedentes del sensor MODIS a bordo del satélite Terra y la precipitación estimada por el sensor activo radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM. Se presenta la distribución espacial y la evolución temporal de los índices ISS, ICV, ICT e ICP. El ISS se obtuvo mediante la técnica del análisis de componentes principales a partir de los índices como el ICV, ICT e ICP. Para la evaluación de los índices se usaron los datos in-situ de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas del SENAMHI.

En el mapa de tierras secas del Perú se identifica cuatro categorías de tierras: Hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas, siendo las tierras hiperáridas (los desiertos) ocupan el 9.39 % del territorio nacional (MINAM, 2012). Es por ello el presente trabajo se realizó el análisis en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca. Las zonas hiperáridas se caracterizan por una baja e irregular precipitación (la variación interanual de la precipitación puede ser del 100 %), escasa vegetación perenne y la agricultura y el pastoreo en general son inviables. El índice de aridez de la zona hiperarida es menor a 0.05 como se muestra en la Tabla 2.2 (MINAM, 2012). En la zona hiperárida; ante la baja e irregular precipitación, es el factor limitante para el crecimiento de la vegetación y los desiertos, donde no hay precipitaciones en lo absoluto, son consistentes con los hallazgos de otros autores (Lotsch et al., 2003 y Barbosa et al., 2015).

Se identificó las áreas de sequía extrema mediante el promedio anual del ISS y el análisis de la variación del ISS del área de estudio afectadas por la sequía extrema y el análisis de correlación de Pearson del IPE con el ISS para las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca.

## **6.1. Distribución espacial y evolución temporal de los índices de sequía en el área de estudio**

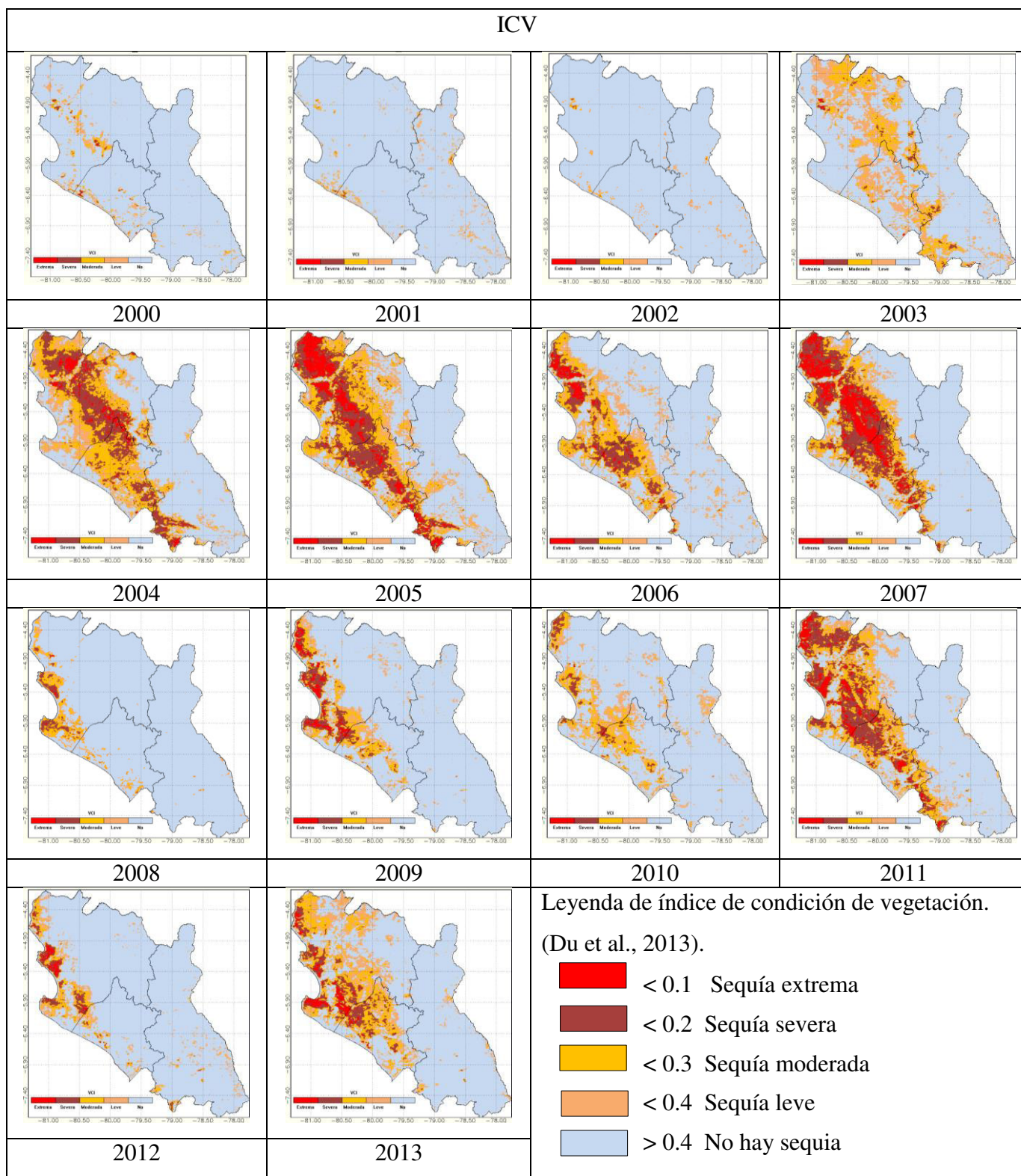
### **6.1.1. Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la vegetación (ICV)**

En la Figura 6.1, se muestra los promedios anuales de la distribución espacial y la evolución temporal del índice de condición de la vegetación (ICV) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca durante el periodo 2000 al 2013. La escala de colores indica los valores de los indicadores aumentando desde 0.0, color rojo en la izquierda, que son valores de extrema sequía, hasta 1.0, color celeste en la derecha, son valores de sequía nula. (Du et al., 2013). La interpretación física de la Figura 6.1 se observa en el promedio anual donde los años 2004, 2005, 2007 y 2011 tienen valores de moderada, severa y extrema sequía en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca, por lo tanto su estado de crecimiento de la vegetación durante el proceso de sequía es muy variante y escaso durante esos años.

Durante los años 2003 y 2004 y los primeros 10 meses del 2005, los impactos de la sequía han ocasionado pérdidas de consideración principalmente en las provincias de Morropón, Ayabaca y Huancabamba y en segundo orden en las provincias de la Costa como Piura, Sullana, Sechura, Paita y Talara. (PRPAD-Región Piura-2005).

Durante el 2004 presento una baja producción de cultivo de caña de azúcar en Pomalca - región Lambayeque (Anculle, 2016).

Durante el 2004 la región de Cajamarca fue afectada por la sequía, lo que ocasionó una reducción de las superficies cosechadas, por lo tanto, se vio influenciado la productividad del año indicado en todos los cultivos según la serie histórica de producción agrícola (Figura 6.3) ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (fecha de acceso 15/07/2016).

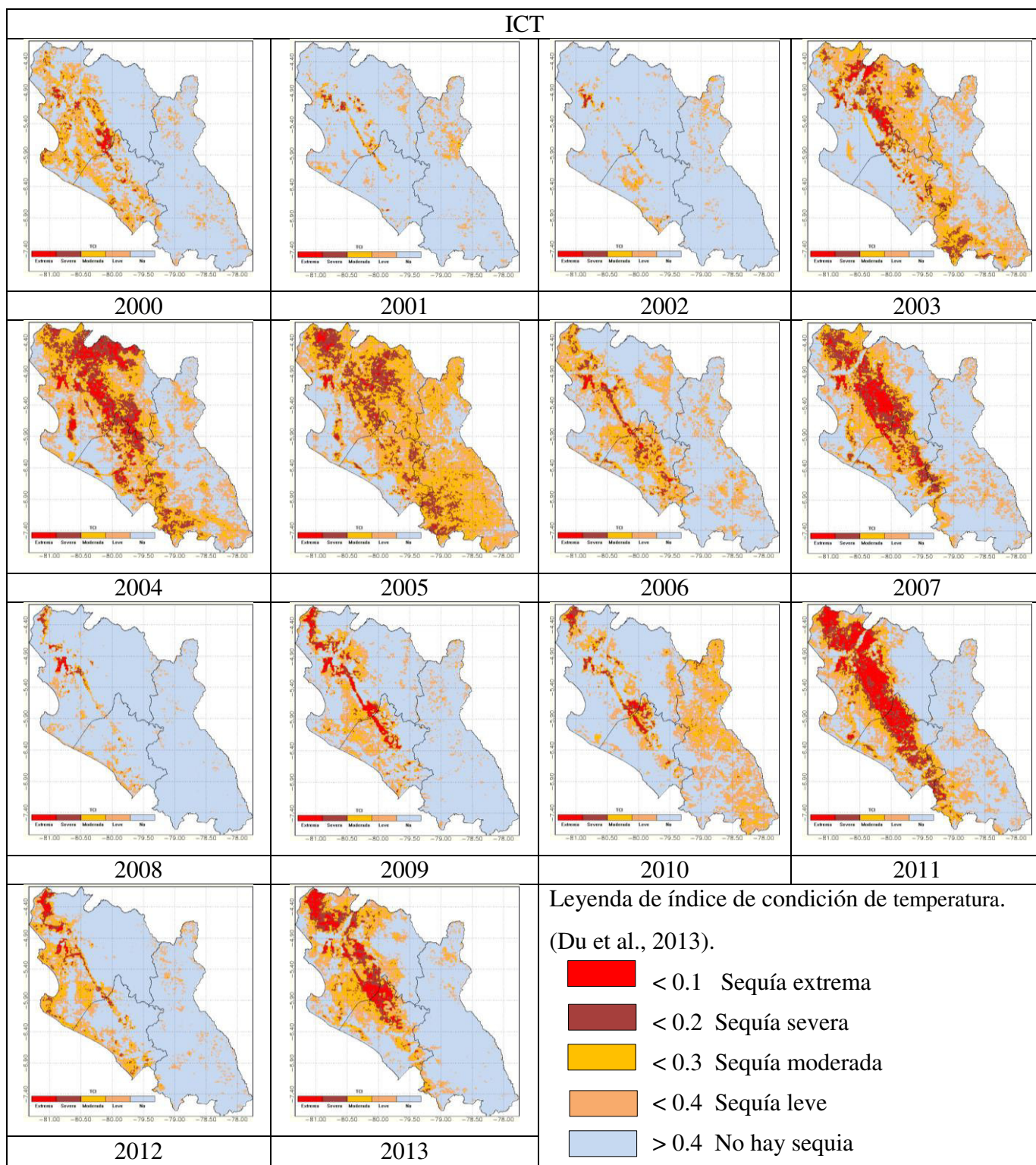


**Figura 6.1.** Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la vegetación (ICV) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

### **6.1.2. Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de temperatura (ICT)**

El producto de la temperatura superficial del suelo para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca durante el periodo 2000 al 2013. En la Figura 6.2, se muestra los promedios anuales de la distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la temperatura (ICT). La escala de colores indica los valores de los indicadores aumentando desde 0, color rojo en la izquierda, que son valores de extrema sequía, hasta 1, color celeste en la derecha, son valores de no hay sequía. (Du et al., 2013). La interpretación física de la Figura 6.2 se observa el promedio anual del ICT donde los años 2004, 2005, 2007, 2011 y 2013 tienen valores de moderada, severa y extrema sequía en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca, por lo tanto hay un estrés térmico del suelo durante esos años.





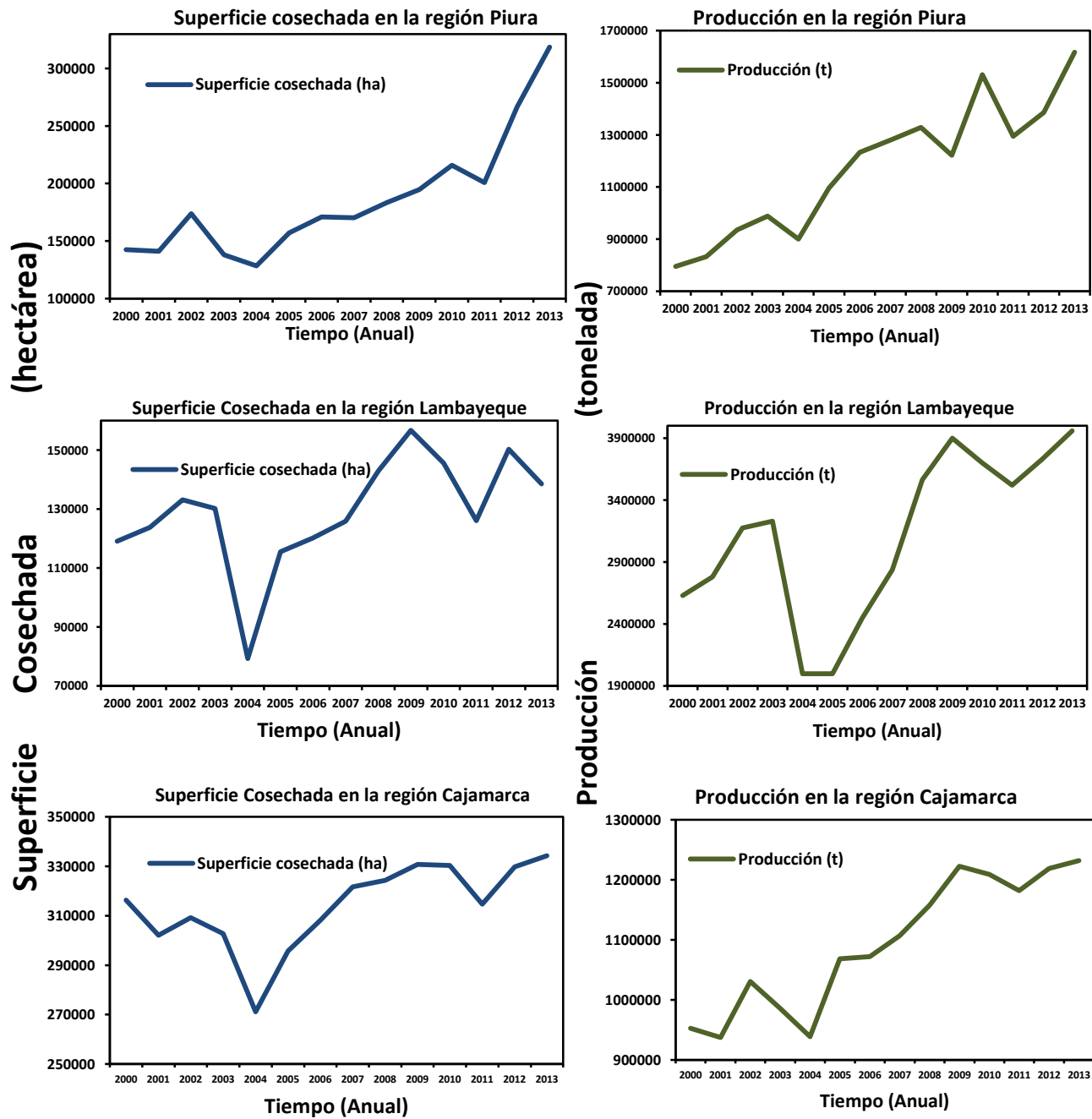
**Figura 6.2.** Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la temperatura (ICT) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

### **6.1.3. Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de precipitación (ICP)**

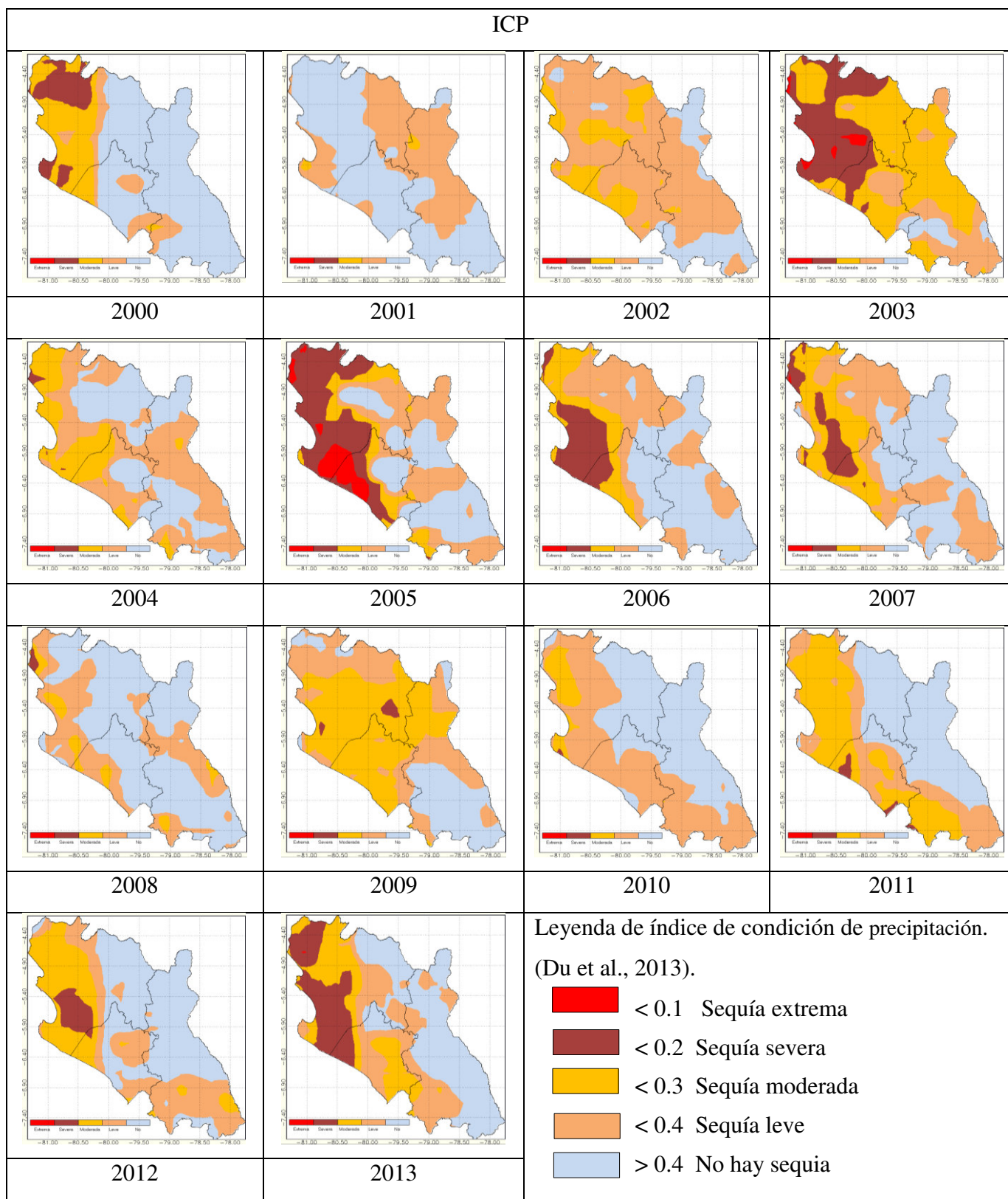
La imagen de precipitación estimada por el sensor activo radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM para la región de Piura, región Lambayeque y región Cajamarca durante el periodo 2000 al 2013. En la Figura 6.4, se muestra los promedios anuales de la distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la precipitación (ICP), donde se observa el promedio anual del ICP de los años 2003 y 2004 presentan valores de sequía severa y extrema, mientras el 2005, 2009 y 2013 tiene valores de sequía moderada y leve en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca, por lo tanto hay un déficit de precipitación moderado durante esos años. La escala de colores indica los valores de los índices aumentando desde 0, color rojo, que son valores de extrema sequía, hasta 1, color celeste, son valores donde no hay sequía. (Du et al., 2013).

La sequía ha afectado principalmente a las provincias de Ayavaca, Huancabamba, Morropón, Sullana (Lancones) y Piura. Ha ocasionado la pérdida de miles de hectáreas de cultivos instalados o dejadas de instalar; pérdida de hatos de ganado debido a la escasez de pastos y ha propiciado la migración del poblador rural a las ciudades urbano marginales. (PRPAD-Región Piura-2005).

Según la serie histórica de producción agrícola del MINAGRI, durante el 2004 la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca, hubo sequía y lo que ocasionó una reducción de las superficies cosechadas, por lo tanto, se vio influenciado en la producción del año indicado en todos los cultivos para las regiones Piura y Cajamarca, en el caso de la región Lambayeque la producción se ve influenciado en el 2004 y 2005 (Figura 6.3) ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (fecha de acceso 15/07/2016).



**Figura 6.3.** Serie de tiempo producción agrícola para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca ([http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)) (Fecha de acceso 15/07/2016).



**Figura 6.4.** Distribución espacial y evolución temporal del índice de condición de la precipitación (ICP) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

Según reportes de la Dirección Regional de Agricultura entre Enero y Febrero del 2004 por efecto de la sequía se han perdido 9028 Has de Cultivos instalados, valorizados en S/. 7273262.63. Ver Tabla 6.1. (PRPAD-Región Piura-2005).

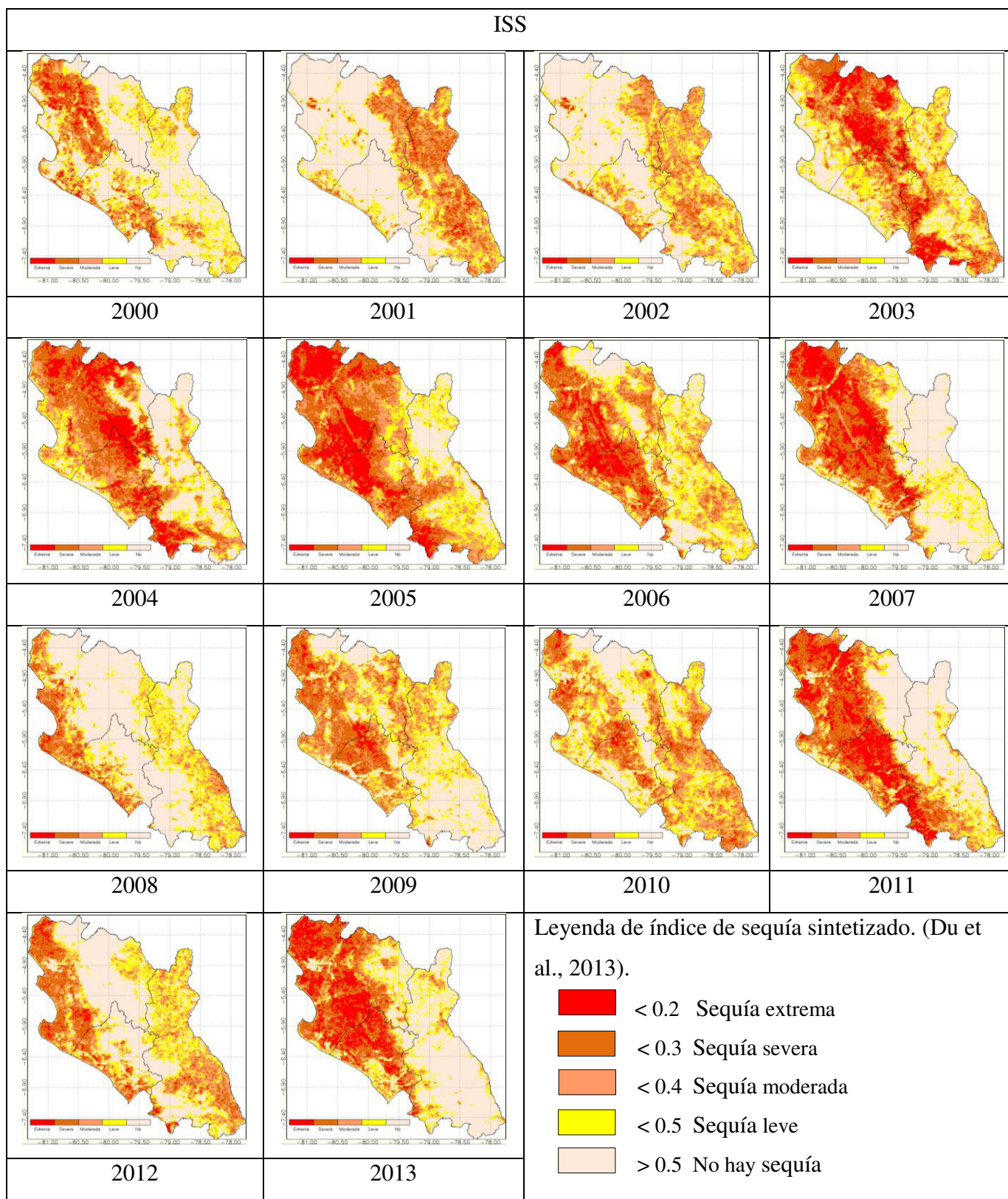
Agencia Agraria	Sequía			
	Área Afectada (Has)	Valorización en Nuevos Soles	Área Perdida (Has)	Valorización S./
<b>Ayabaca</b>	4707	1690801.47	2793	2265988.83
<b>Morropón</b>	395.4	406131.16	420	340620.00
<b>Huancabamba</b>	6510	2509214.40	5625	4514175.00
<b>Sullana</b>	0	0	190	152478.80
<b>Total</b>	<b>11612.40</b>	<b>4606147.03</b>	<b>9028</b>	<b>7273262.63</b>

**Tabla 6.1.** Áreas perdidas y afectadas por sequía en la campaña agrícola 2003/2004 (PRPAD-Región Piura-2005).

#### **6.1.4. Distribución espacial y evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS)**

En la Figura 6.5, se muestra el promedio anual de la distribución espacial y la evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca durante el periodo 2000 al 2013, se observa en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca, los promedios anuales en los años 2003, 2004, 2005, 2007, 2011 y 2013 tiene valores de moderada, severa y extrema sequía por lo tanto el ISS es la sequía que integra el déficit de precipitación, el estrés térmico del suelo y el estado de crecimiento de la vegetación durante la sequía en los años mencionados. La escala de colores indica los valores de los indicadores aumentando desde 0, color rojo, que son valores de extrema sequía, hasta 1, color rosa palo, son valores de no hay sequía (Du et al., 2013).

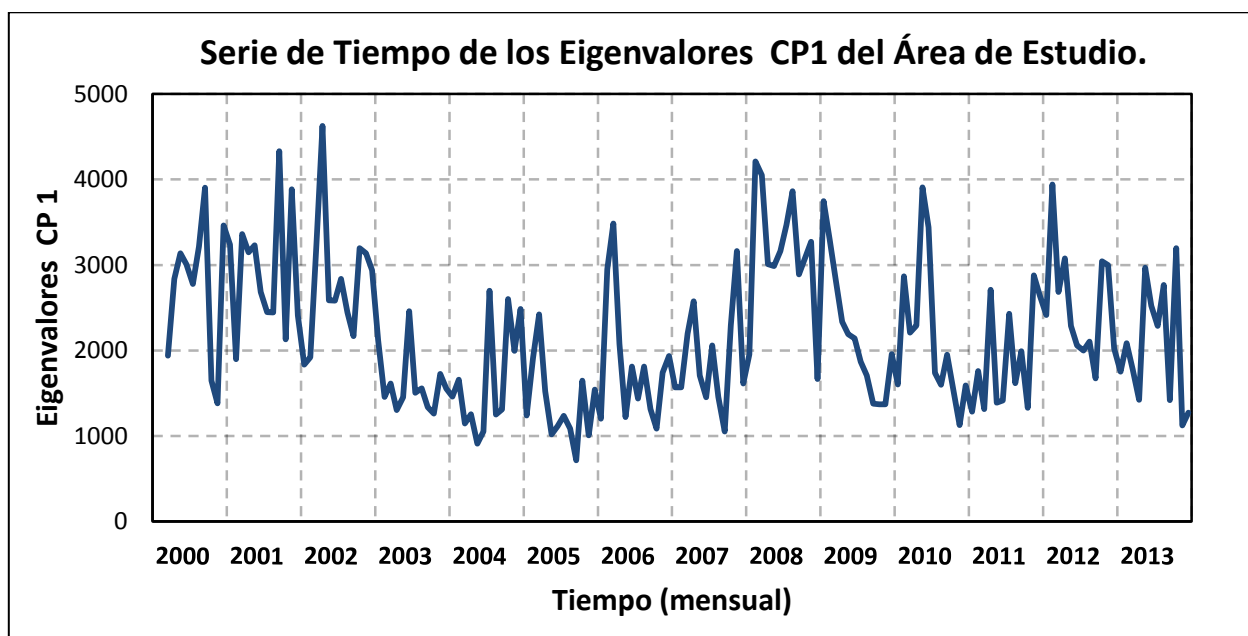




**Figura 6.5.** Distribución espacial y evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS) para la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

## 6.2. Serie de tiempo del primer componente principal CP1 de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca

El primer componente principal (CP1) contiene información más del 75 % de las tres bandas ICV, ICT e ICP de marzo 2000 y así para cada mes hasta diciembre 2013, el CP1 se define como un nuevo índice de sequía, es decir, el índice de sequía sintetizado (ISS) Figura 6.6. (Du et al., 2013). Basado en el método de ACP, se ha producido un conjunto de datos del ISS entre marzo del 2000 hasta diciembre del 2013. El ISS también se divide en cinco clases (Tabla 2.4). Con el desarrollo del conjunto de datos de validación, los esquemas de clasificación podrían ser revisadas en base a nuevos estudios.



**Figura 6.6.** Serie de tiempo de la variancia del primer componente principal (CP1) contiene información más del 75 % en toda la serie a partir de ICV, ICT e ICP y se define como un nuevo índice de sequía, es decir, el índice de sequía sintetizado (ISS).

## 6.3. Serie de tiempo de los índices para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca

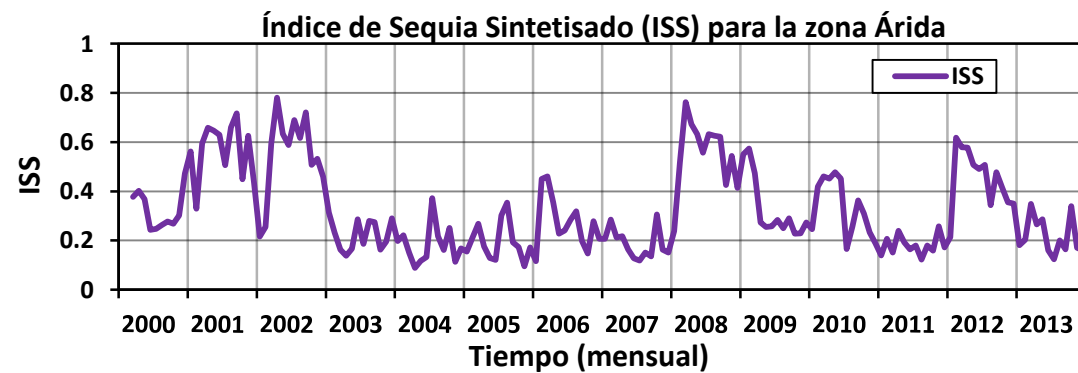
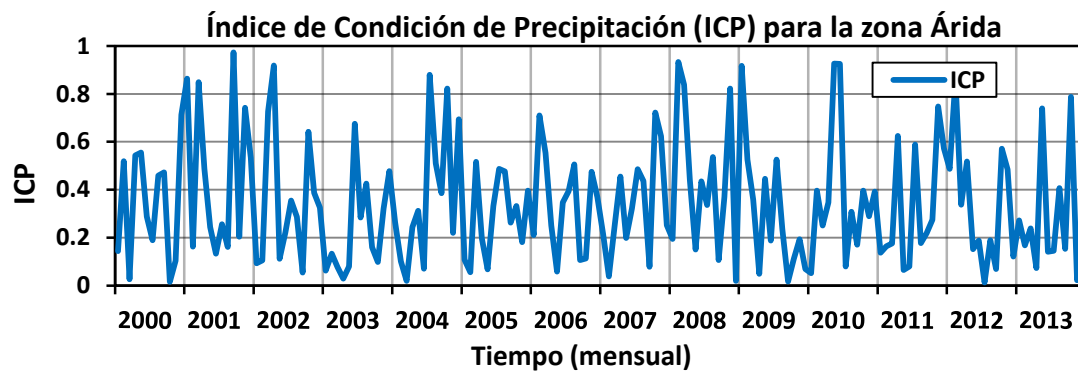
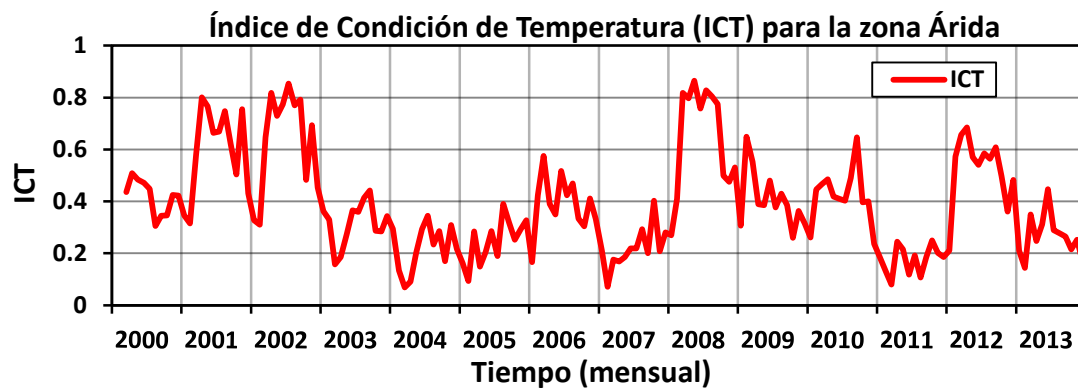
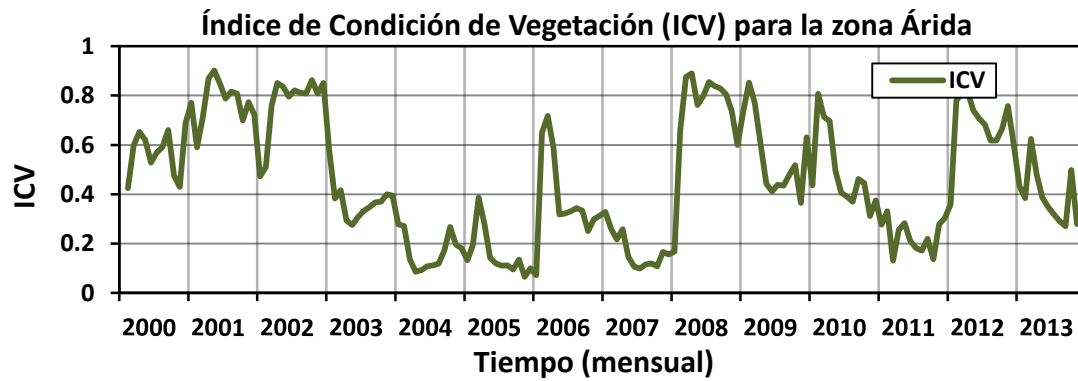
Para cada zona: árida, semiárida y subhúmeda seca de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca durante el 2000 al 2013, la serie de tiempo de los índices ISS, ICV, ICT e ICP del promedio espacial mensual. La zona hiperárida, es una zona desértica con muy escasa vegetación y ausencia de lluvia por completos en años normales (MINAM, 2012).

Para la zona árida en la Figura 6.7. Los índices: ISS, ICV e ICT en los años 2003, 2004 y 2005 indican severa y extrema sequía los valores menores a 0.3, para el ICP fines del 2002, el 2003 de enero a mayo, 2004 de enero a junio, inicios del 2007, el 2009 de agosto a diciembre, el 2010 inicios y de julio a diciembre, el 2011 inicios, el 2012 de mayo a setiembre y diciembre y el 2013 la mayoría de los meses indican moderada, severa y extrema sequía los valores menores a 0.4.

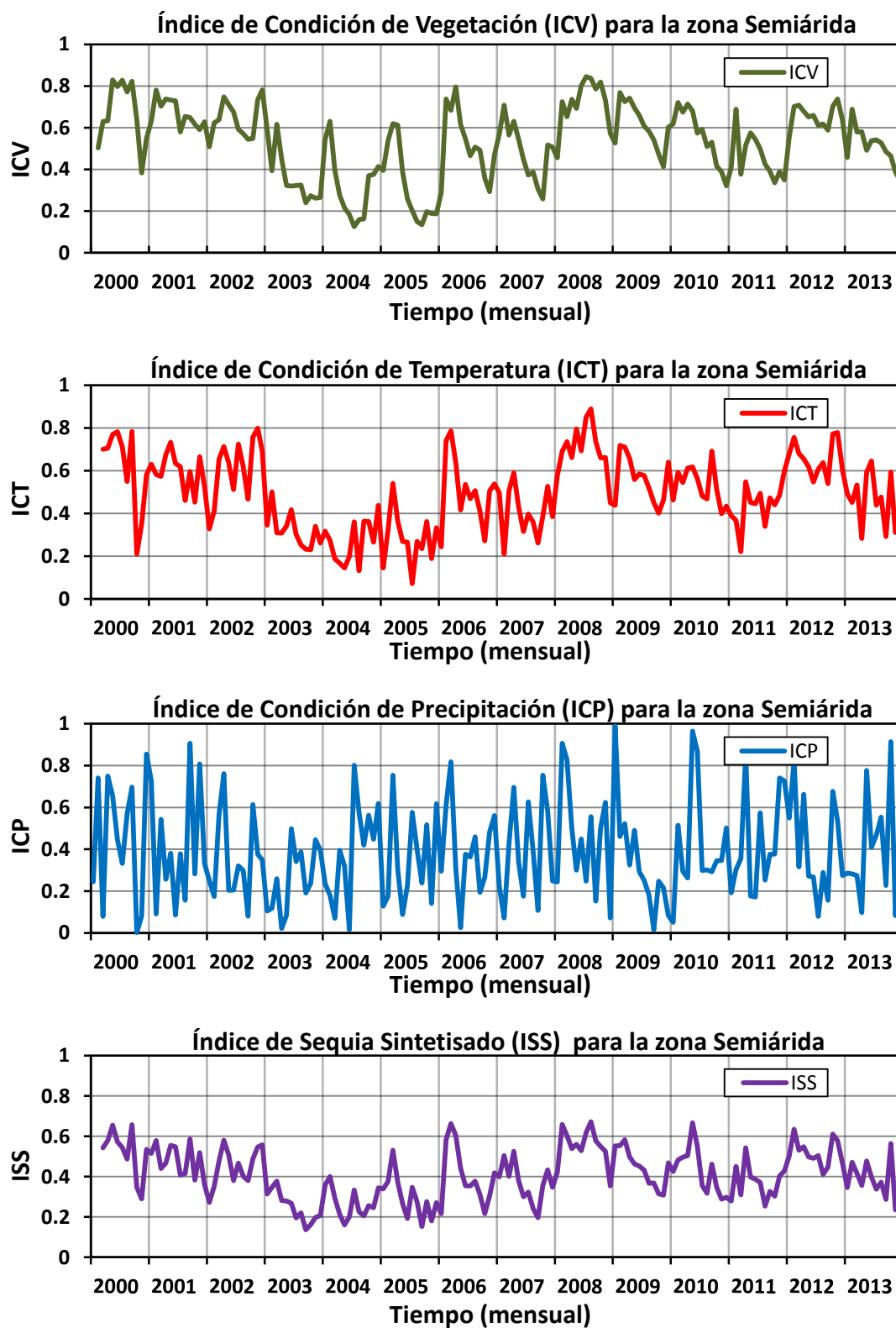
Para la zona semiárida en la Figura 6.8. Los índices: ISS, ICV e ICT en los años 2003, 2004 y 2005 indican moderada, severa y extrema sequía los valores menores a 0.4, para el ICP el 2001 de abril a junio, noviembre y diciembre, el 2002 inicios, mayo a setiembre, el 2003 de enero a mayo, julio a diciembre, el 2004 de enero a junio, el 2005 enero, febrero, abril a junio, agosto, setiembre y noviembre, el 2006 de abril a julio, el 2009 de junio a diciembre, el 2010 enero y julio a noviembre, el 2011 de enero a marzo y agosto a octubre, el 2012 mayo a setiembre y diciembre, el 2013 de enero a abril, noviembre y diciembre indican moderada, severa y extrema sequía los valores menores a 0.4.

Para la zona subhúmeda seca en la Figura 6.9. Los índices: ISS, ICV e ICT en los años 2003, 2004 y 2005 indican moderada y severa sequía los valores son menores a 0.5, para el ICP el 2002 inicios, mayo a setiembre, noviembre y diciembre, el 2003 de enero a mayo, julio a octubre y diciembre, el 2004 de enero a marzo, mayo, junio, agosto y setiembre, el 2005 enero, febrero, mayo, junio, agosto, setiembre y noviembre, el 2007 enero, febrero, junio, agosto, setiembre y diciembre, el 2009 febrero, junio a diciembre, el 2010 enero, marzo, abril, agosto a noviembre, el 2011 enero, febrero, mayo junio y agosto, el 2012 marzo, mayo a julio, setiembre y diciembre, el 2013 de enero a abril, setiembre, noviembre y diciembre indican moderada, severa y extrema sequía los valores menores a 0.4.

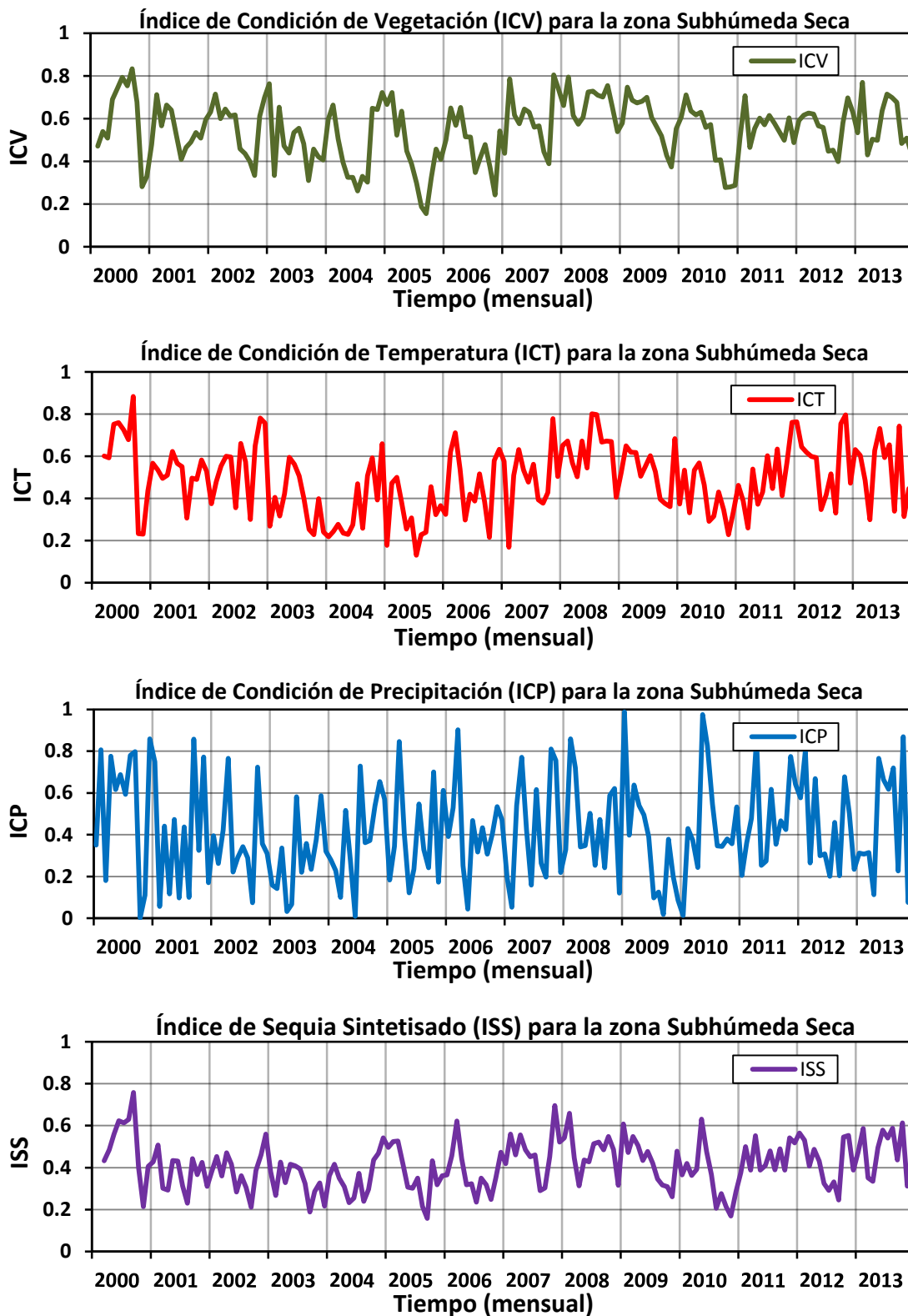




**Figura 6.7.** Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona árida de la región de Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.



**Figura 6.8.** Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona semiárida de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.



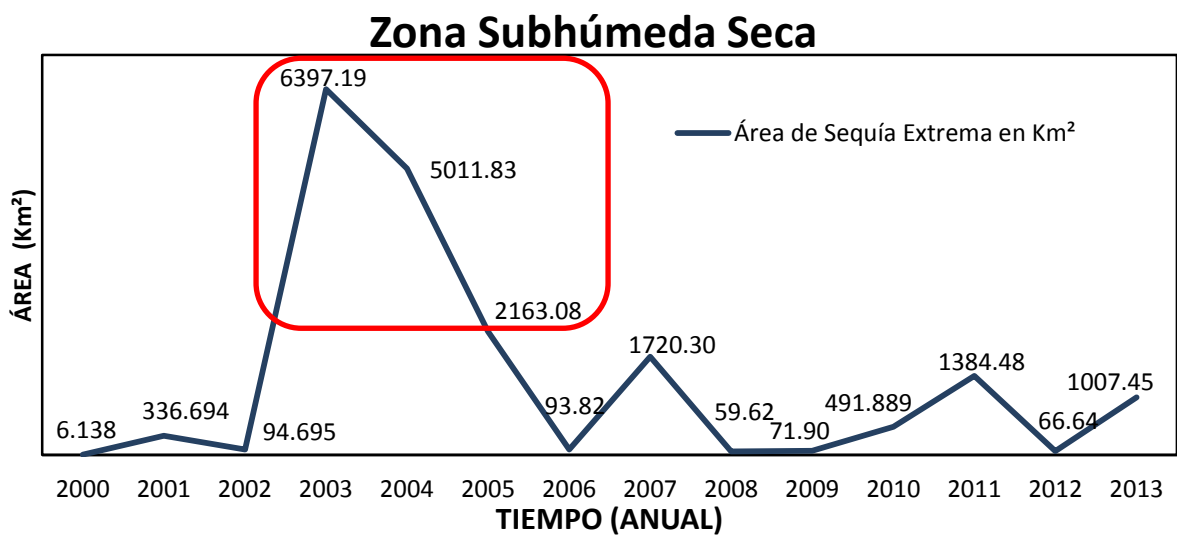
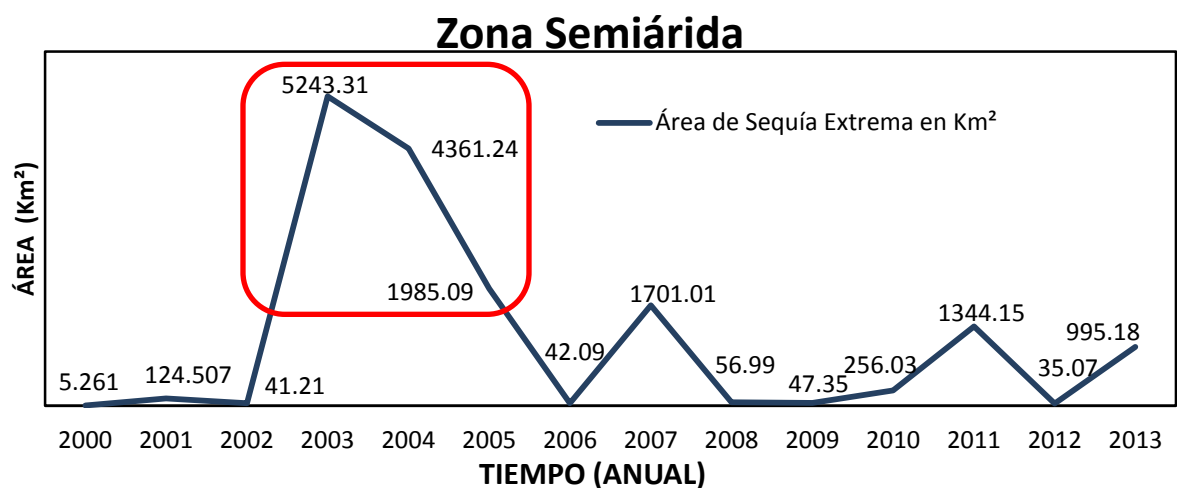
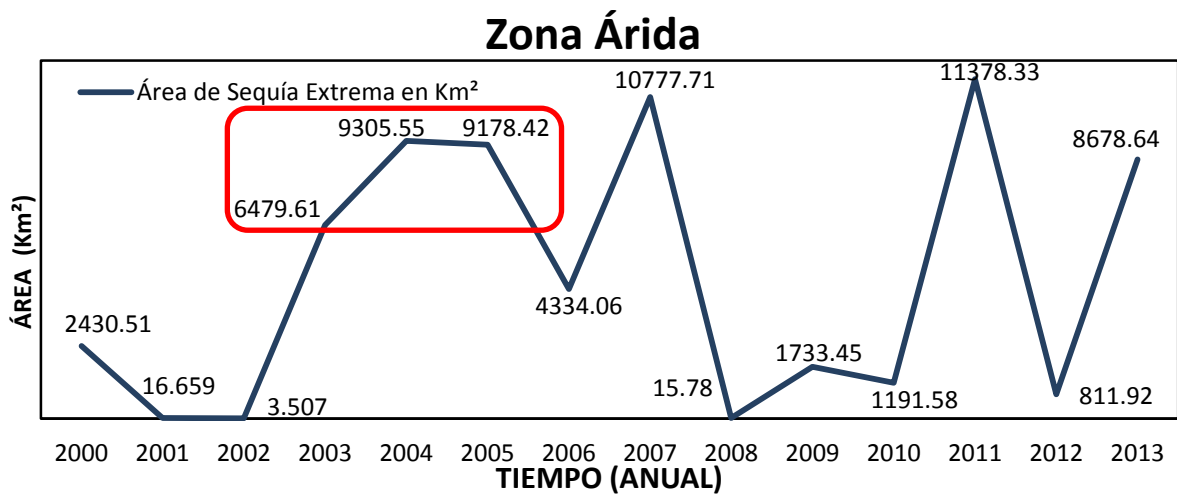
**Figura 6.9.** Serie de tiempo del promedio espacial de los índices ICV, ICT, ICP, ISS para la zona subhúmeda seca de la región de Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

#### 6.4. Serie de tiempo de las áreas de sequía extrema del índice de sequía sintetizado (ISS)

En la Tabla 6.2 se muestra, para las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca, las áreas de sequía extrema en km<sup>2</sup> por zonas. La *zona árida*, en el año 2003, tuvo un área en sequía extrema de 6479.605 km<sup>2</sup>, en el 2004, se incrementó a 9305.554 km<sup>2</sup> y en el 2005, alcanzó 9178.417 km<sup>2</sup>. La *zona semiárida*, en el año 2003, alcanzó un total de área en sequía extrema de 5243.307 km<sup>2</sup>, en el año 2004, tuvo 4361.239 km<sup>2</sup> y en el año 2005, se redujo el área de sequía extrema a 1985.091 km<sup>2</sup>. La *zona subhúmeda seca*, en el año 2003, alcanzó un área en sequía extrema de 6397.185 km<sup>2</sup>, en el año 2004, tuvo un área en sequía extrema de 5011.830 km<sup>2</sup> y en el año 2005, tuvo 2163.083 km<sup>2</sup>; en estas tres zona han sufrido un periodo de sequía largo de 3 años en la cual presentó un gran déficit de precipitación lo cual llevó a un estrés térmico de suelo y con repercusiones en la agricultura en esta zonas ver Figura 6.10.

Área de sequía extrema en km <sup>2</sup> del ISS.			
Años	Árida	Semiárida	Subhúmeda seca
2000	2430.51	5.261	6.138
2001	16.659	124.507	336.694
2002	3.507	41.21	94.695
2003	6479.61	5243.31	6397.19
2004	9305.55	4361.24	5011.83
2005	9178.42	1985.09	2163.08
2006	4334.06	42.09	93.82
2007	10777.71	1701.01	1720.30
2008	15.78	56.99	59.62
2009	1733.45	47.35	71.90
2010	1191.58	256.03	491.889
2011	11378.33	1344.15	1384.48
2012	811.92	35.07	66.64
2013	8678.64	995.18	1007.45

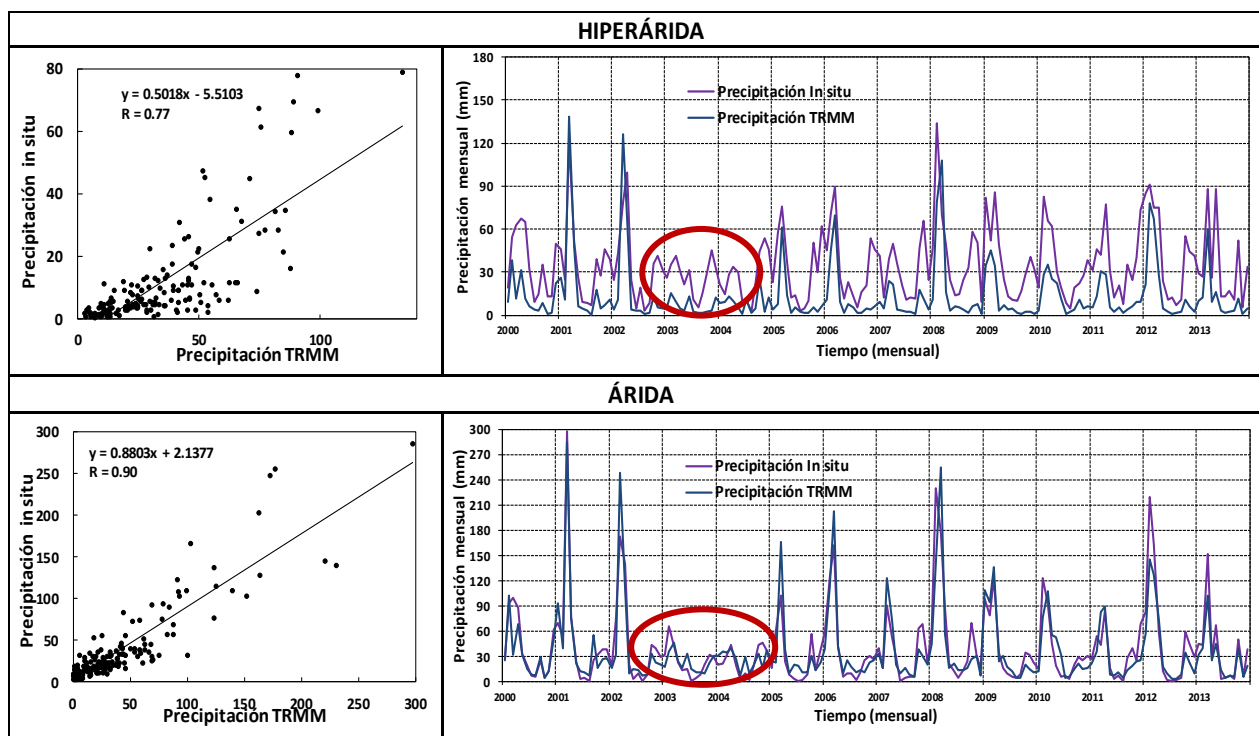
**Tabla 6.2.** Presenta las áreas de sequía extrema del ISS en las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca para el periodo del 2000 - 2013 en la región Lambayeque, región Piura y región Cajamarca.



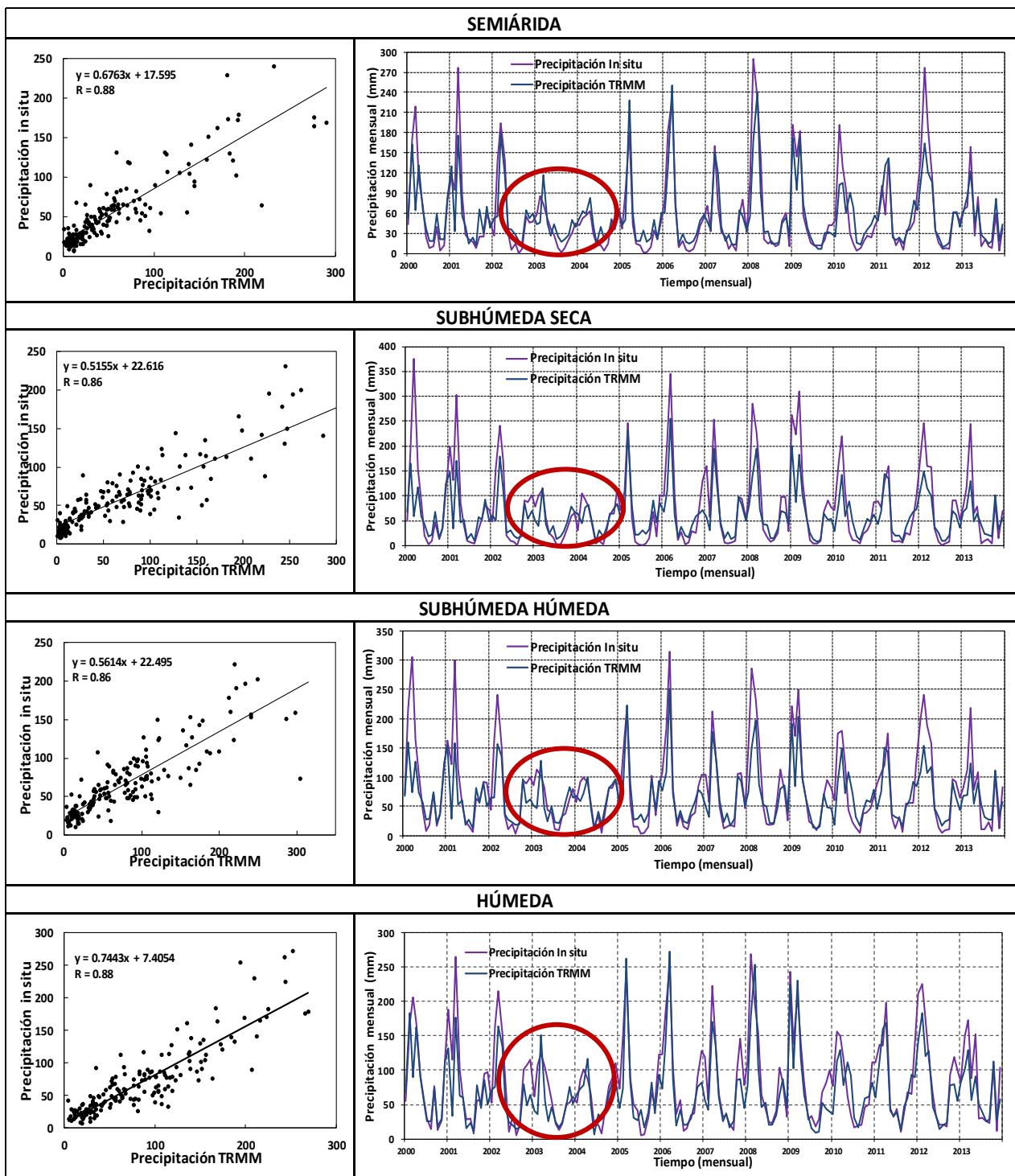
**Figura 6.10.** Serie de las áreas de sequía extrema del ISS en la zona árida, semiárida y subhúmeda seca para el periodo del 2000 - 2013 de la región Lambayeque, región Piura y región Cajamarca.

## 6.5. Análisis de correlación de la precipitación in-situ y la precipitación TRMM.

En la Figura 6.11. y la Figura 6.12. Se muestra la serie del promedio espacial de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas y la serie del promedio espacial de precipitación mensual de TRMM para cada zona de aridez donde se observa los déficits de precipitación en los años 2003 y 2004. También se muestra la gráfica de dispersión entre las series de tiempo de precipitación de las estaciones meteorológicas y precipitación del TRMM para cada zona de aridez, observándose en la zona hiperarida una alta correlación de 0.77, en la zona árida una alta correlación de 0.90, en la zona semiárida una alta correlación de 0.88, en la zona subhúmeda seca una alta correlación de 0.86, en la zona subhúmeda húmeda una alta correlación de 0.86, en la zona húmeda una alta correlación de 0.88. Esto demuestra una buena aproximación de los datos de precipitación TRMM en la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.



**Figura 6.11.** El diagrama de dispersión y la serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas (morado) y serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual del TRMM (azul), para las zonas hiperarida y árida de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.



**Figura 6.12.** El diagrama de dispersión y la serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas (morado) y serie de tiempo del promedio espacial de precipitación mensual del TRMM (azul), para las zonas semiárida, subhúmeda seca, subhúmeda húmeda y húmeda de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca.

## **6.6. Evaluación de los índices de sequía con el índice de precipitación estandarizada (IPE)**

El IPE, desarrollado por McKee et al. (1993, 1995), se basa en los datos de precipitación, el IPE tiene la ventaja de ser fácilmente calculado, tiene como requisitos una cantidad considerable de datos, y ser independiente de la magnitud de la precipitación media y por lo tanto es comparable a lo largo de una gama de zonas climáticas. Se calcula mediante la diferencia entre la precipitación total mensual histórica y su media estacional a largo plazo entre la desviación estándar durante un período específico de tiempo y lugar. (Giuseppe R. et al., 2007). Una de las ventajas significativas del IPE es que se puede calcular en diferentes escalas de tiempo para evaluar el inicio, duración, gravedad, extensión y final con respecto a la sequía meteorológica. Se ha calculado utilizando los datos de precipitación mensual in situ durante 1970-2013 para obtener la serie de tiempo del IPE de los 65 datos in-situ. Los IPEs durante 2000-2013 se utilizaron para evaluar con los índices (ISS, ICV, ICT e ICP).

Los IPEs, son calculados con los datos de precipitación acumulada mensual in-situ de una serie de tiempo del 1970 al 2013, donde: El IPE1 (es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 1 mes), es calculado para cada mes en toda la serie mensual. El IPE3 (es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses), es calculado mensualmente con la acumulación de 3 meses. El IPE6 (es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 6 meses), es calculado mensualmente con la acumulación de 6 meses. El IPE9 (es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 9 meses), es calculado mensual con la acumulación de 9 meses. El IPE12 (es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 12 meses), es calculado mensual con la acumulación de 12 meses.

Dado que la influencia de la sequía sobre la vegetación tiene alrededor de 3 meses de desfase en zonas subhúmedas seca y semiáridas (Udelhoven et al., 2009), se calculó en el presente estudio una escala de 1, 3, 6, 9 y 12 meses el IPE (IPE 1, IPE 3, IPE 6, IPE 9, IPE 12) para las zonas áridas, semiárida y subhúmeda seca de la región de Piura, Lambayeque y Cajamarca ver los resultados en (Anexo C8). El IPE 3 refleja las condiciones de humedad a mediano plazo y proporciona una estimación estacional de la precipitación. Por lo tanto, es más adecuado evaluar en las zonas áridas, semiárida y subhúmeda seca de la región de Piura, Lambayeque y Cajamarca

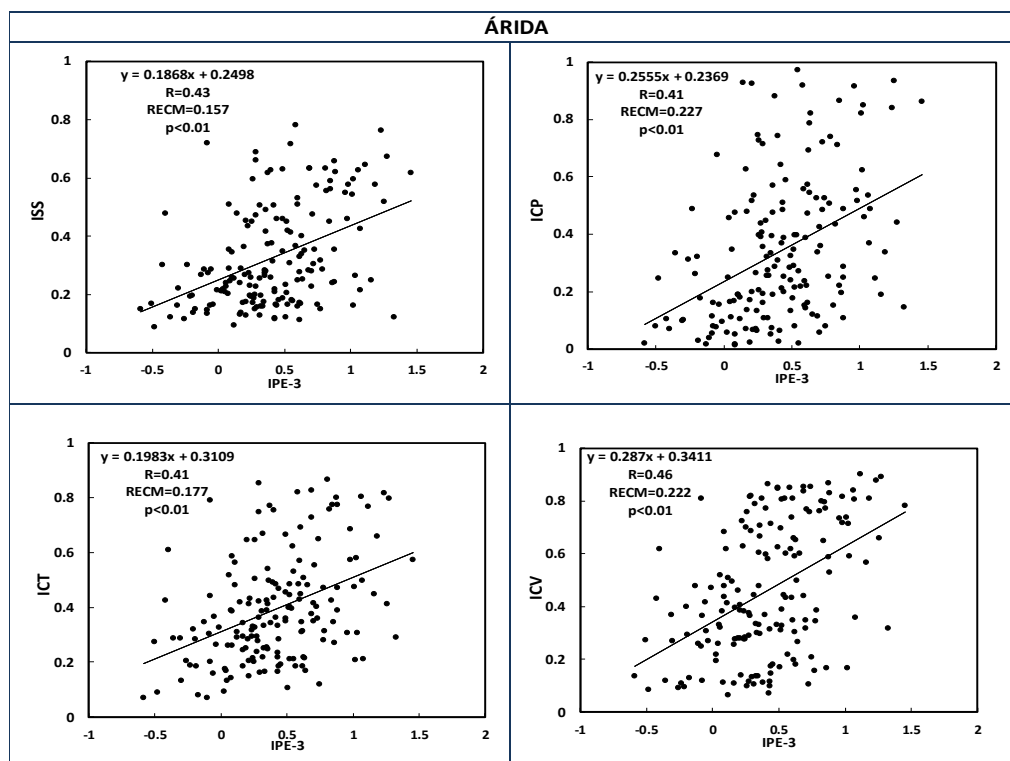


de los índices de sequía ISS, ICV, ICT e ICP para ello hacemos un análisis de correlación de Pearson.

#### **6.6.1. Análisis de correlación de Pearson de los índices de sequía y el índice de precipitación estandarizado (IPE) para el área de estudio**

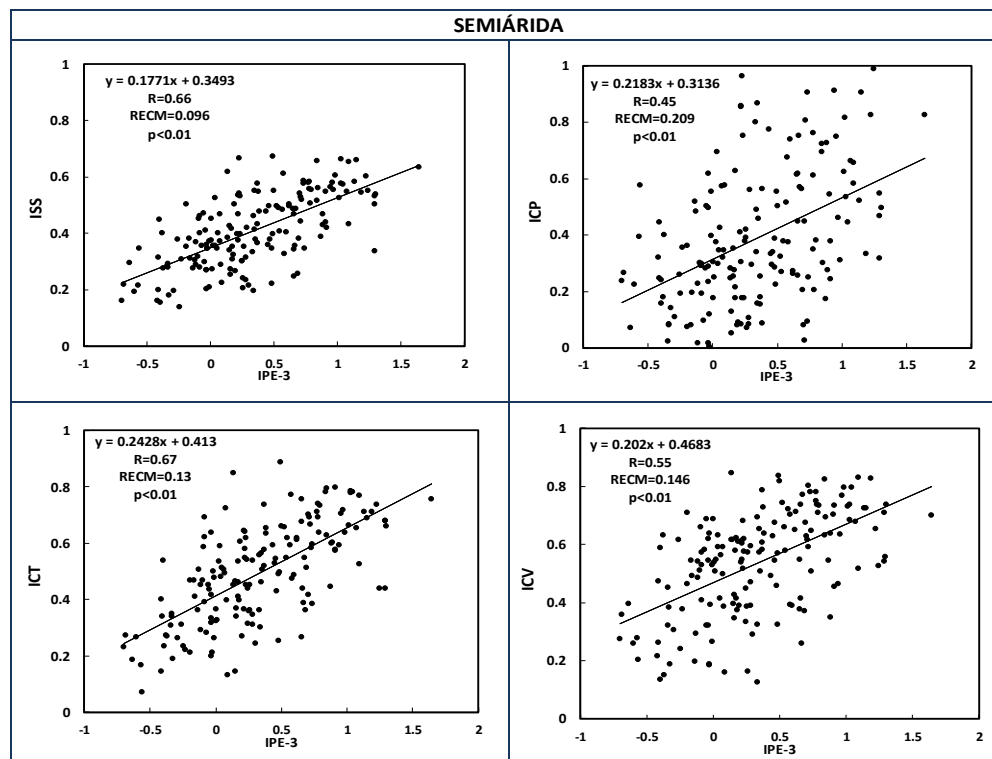
El promedió espacial mensual de las imágenes ISS, ICV, ICT e ICP en las 3 zona: árida, semiárida y subhúmeda seca de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca y cada índice se evaluó con el IPE 3 calculado a partir de los datos in-situ promediando para las 3 zonas correspondientes de marzo del 2000 a diciembre del 2013 usando el análisis de correlación lineal de Pearson y la medida del error el RMSE.

En la Figura 6.13., se presentan las relaciones del diagrama de dispersión entre la serie de promedio mensual del IPE-3 de las 11 estaciones in-situ ubicadas en la zona árida y la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP para la zona árida, se basa de un máximo de 166 puntos de promedios mensuales, obtenidos de 166 imágenes del ISS, ICV, ICT e ICP con frecuencia mensual, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (R) y la RECM donde: Para la serie del ISS y IPE-3 se calculó 0.43, para la serie del ICP y IPE-3 se calculó 0.41, para la serie del ICT y IPE-3 se calculó 0.41 y para la serie del ICV y IPE-3 se calculó 0.46, el nivel de confianza (p) menor a 0.01 para cada dispersión lo cual significa que el 99% de los datos son significativos y la raíz del error cuadrado medio (RECM) como medida de error, muestra mejor resultado para la correlación de los ISS e ICT con el IPE-3 y presenta valores más altos para la correlación de los índices ICV e ICP con el IPE-3 es una zona con poca precipitación y vegetación.



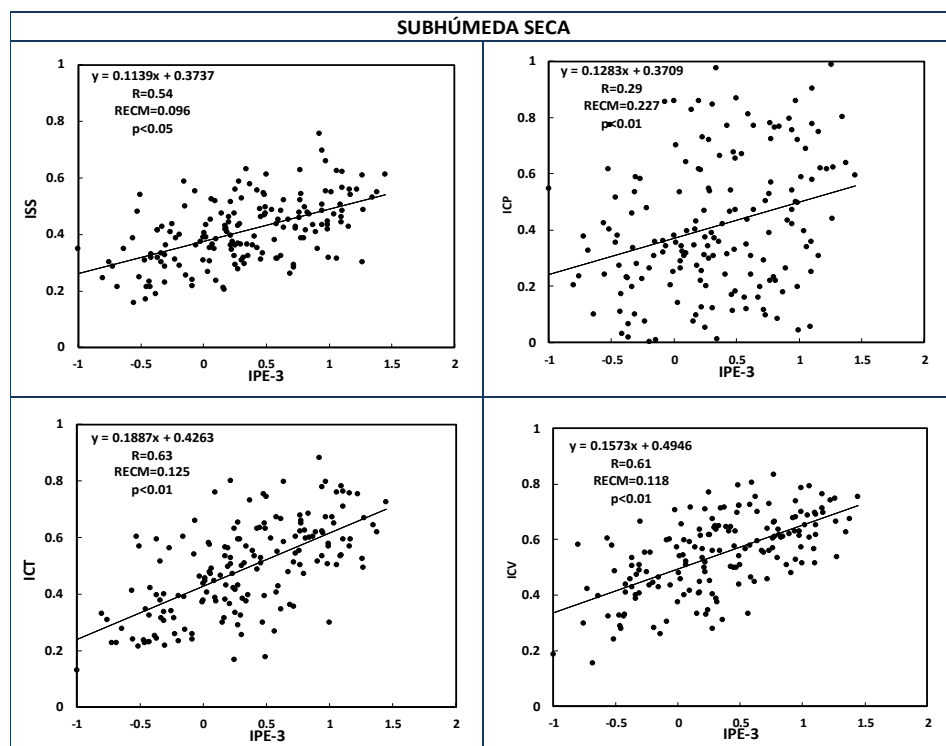
**Figura 6.13.** Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona árida.

En la Figura 6.14, se presentan las relaciones del diagrama de dispersión entre la serie de promedio mensual del IPE-3 de las 12 estaciones in-situ ubicadas en la zona semiárida y la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP para la zona semiárida, se basa de un máximo de 166 puntos de promedios mensuales, obtenidos de 166 imágenes del ISS, ICV, ICT e ICP con frecuencia mensual, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (R) donde: Para la serie del ISS y IPE-3 se calculó 0.66, para la serie del ICP y IPE-3 se calculó 0.45, para la serie del ICT y IPE-3 se calculó 0.67 y para la serie del ICV y IPE-3 se calculó 0.55, el nivel de confianza (p) es menor a 0.01 para cada dispersión lo cual significa que el 99% de los datos son significativos y la raíz del error cuadrado medio (RECM) como medida de error, muestra mejor resultado para la correlación del ISS con el IPE-3, presenta valores intermedios para la correlación de los índices ICT e ICV y presenta valores más altos para la correlación del ICP con el IPE-3 para la zona semiárida.



**Figura 6.14.** Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona semiárida.

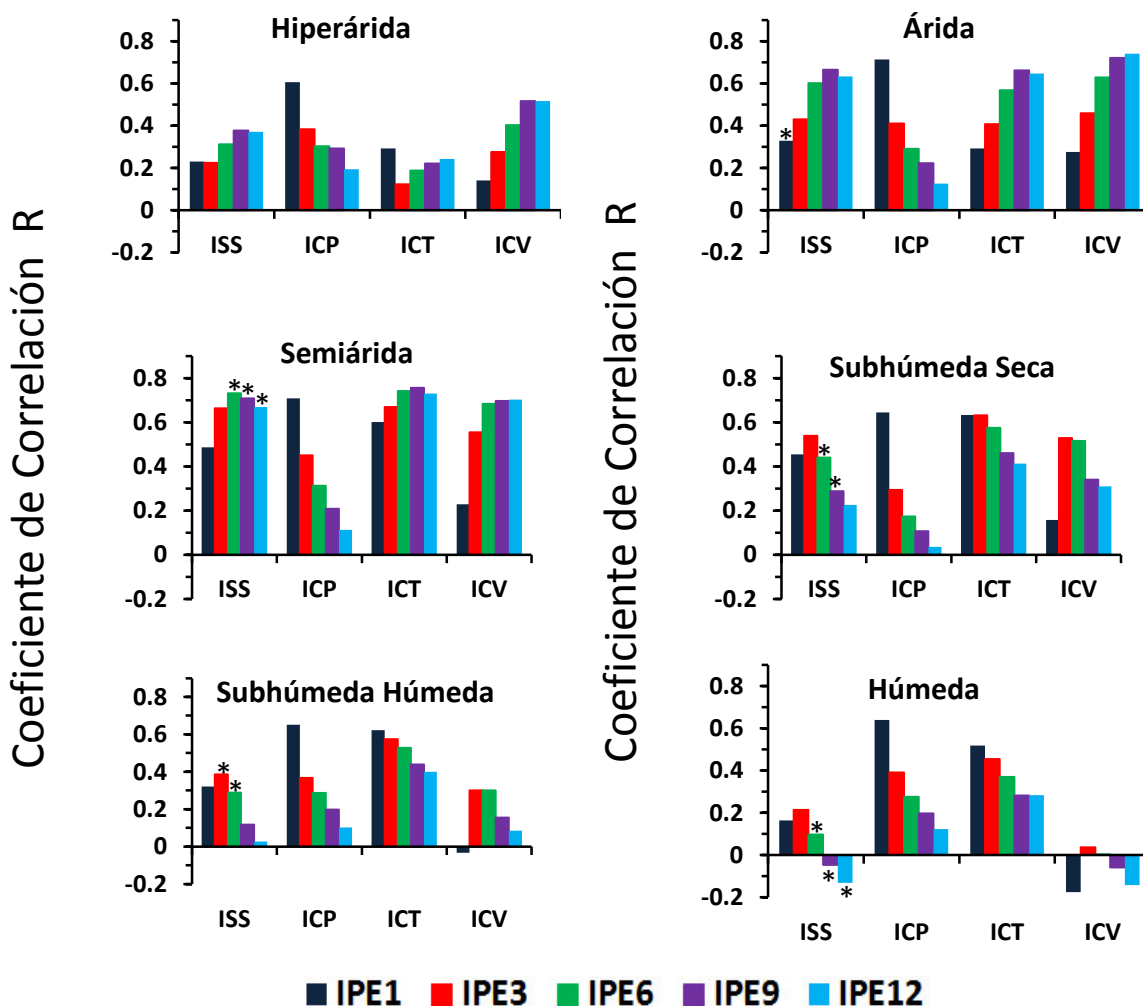
En la Figura 6.15, se presentan las relaciones del diagrama de dispersión entre la serie de promedio mensual del IPE-3 de las 12 estaciones in-situ ubicadas en la zona subhúmeda seca y la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP para la zona subhúmeda seca, se basa de un máximo de 166 puntos de promedios mensuales, obtenidos de 166 imágenes del ISS, ICV, ICT e ICP con frecuencia mensual, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (R) donde: Para la serie del ISS y IPE-3 se calculó 0.54, para la serie del ICP y IPE-3 se calculó 0.29, para la serie del ICT y IPE-3 se calculó 0.63 y para la serie del ICV y IPE-3 se calculó 0.61, y el nivel de confianza (p) menor a 0.01 para las dispersiones ICV- IPE-3, ICT- IPE-3 e ICP- IPE-3 y significa que el 99% de los datos son significativos y solo para la dispersión ISS-IPE-3 su  $p<0.05$  entonces el 95% los datos son significativos y la raíz del error cuadrado medio (RECM) como medida de error, muestra mejor resultado para la correlación del ISS con el IPE-3, presenta valores intermedios para la correlación de los índices ICT e ICV y presenta valores más altos para la correlación del ICP con el IPE-3 para la zona subhúmeda seca.



**Figura 6.15.** Diagrama de dispersión entre la serie de tiempo del promedio espacial mensual de los índices del ISS, ICV, ICT e ICP y la serie de promedio del IPE-3 para la zona Subhúmeda seca.

En la Figura 6.16, se muestra el análisis de correlación del índice de precipitación estandarizada (IPE) con cada uno de los índices ISS, ICP, ICT e ICV en las zonas áridas, semiárida y subhúmeda seca para la región de Piura, Lambayeque y Cajamarca durante el periodo 2000 al 2013.

Se realizó el promedio espacial mensual del ISS, ICV, ICT e ICP para las 6 zonas de índice de aridez (hiperárida, árida, semiárida, subhúmeda seca, subhúmeda húmeda y húmeda) de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca. Por otro lado se utilizó los 65 datos de precipitación mensual in situ durante 1970-2013 se obtuvo la serie de tiempo mensual del IPE para los 65 datos in - situ, se promedió la serie de los IPEs (IPE 1, IPE 3, IPE 6, IPE 9, IPE 12) correspondiente a cada una de las zonas de índice de aridez (hiperárida, árida, semiárida y subhúmeda seca, subhúmeda húmeda y húmeda) de las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca.



**Figura 6.16.** El coeficiente de correlación entre los índices de sequía y el IPE en diferentes escalas de tiempo para las 6 zonas de índices de aridez. Los valores de R más altos indican en la zona árida y semiárida. Donde el nivel de significancia (p) es mayor a 0,05, excepto para los datos con asterisco (\*).

Para la evaluación de los índices (ISS, ICV, ICT e ICP) con los IPEs, donde los IPEs se utilizaron de marzo del 2000 a diciembre del 2013 correspondientes a cada zona de índice de aridez. En la Figura 6.16 se indica los coeficientes de correlación entre los índices de sequía y los IPEs. Se observa para la zona hiperárida presentan una baja correlación los IPEs con los índices de sequía excepto con el IPE1 y el ICP ( $r=0.61$ ), el IPE9 y el ICV ( $r=0.52$ ), el IPE12 y el ICV ( $r=0.52$ ), en la zona hiperárida hay una escasa vegetación y la precipitación es baja e irregular. Para la zona árida presentan una correlación moderada el IPE (IPE 3, IPE 6, IPE 9, IPE 12) con los índices ISS, ICT e ICV ( $r>0.43$ ), en la zona árida hay pastoreo, pero no la agricultura por regadío y la

precipitación anual esta entre 80 – 150mm y 200 – 350mm. Para la zona semiárida presentan una alta correlación el IPE (IPE 3, IPE 6, IPE 9, IPE 12) con los índices ISS, ICT e ICV ( $r>0.56$ ) excepto con el ICP, en la zona semiárida es posible el pastoreo, la agricultura de regadío, variabilidad en la producción y la precipitación esta entre 400 a 700-800mm en verano y 200 – 250 a 450-500mm en el invierno. Para la zona subhúmeda seca presentan una alta correlación el IPE (IPE 3) con los índices ICT, ISS e ICV ( $r>0.56$ ) excepto con el ICP, en la zona subhúmeda seca la agricultura se practica de manera regular y variabilidad interanual de la precipitación es menor a 25%. Para la zona subhúmeda húmeda presentan una buena correlación el IPE (IPE 3) con el índice ICT ( $r=0.57$ ) excepto con el ISS, ICP e ICV, en la zona subhúmeda húmeda el mejor índice es el ICT mientras no son significativos. Para la zona húmeda ningún índice presentan una buena correlación con el IPE (IPE1, IPE3, IPE6, IPE9, IPE12), por tanto en la zona húmeda ninguno de los índices (ISS, ICV, ICT e ICP) indica la sequía. En el cual el IPE 3 refleja las condiciones de humedad mediano plazo y proporciona una estimación estacional de la precipitación. En este resultado muestra debido a su situación geográfica, tipo de suelo, topografía, relieve, etc., presentan un comportamiento particular de la vegetación, temperatura del suelo y precipitación.

### CONCLUSIONES

#### 7.1. Conclusiones

1. El primer componente principal del ICV, ICT e ICP; se define como el índice de sequía sintetizado (ISS) que vigila el inicio, la duración, el alcance y la gravedad de la sequía, el ISS sintetiza el déficit de precipitación, el estrés térmico del suelo y el estado de crecimiento de la vegetación en el proceso de sequía y es favorable para vigilar la sequía integral. El presente trabajo, en el periodo 2000-2013 en el que se realizó el ISS en la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca, los resultados indicaron que la sequía ocurrió en los años 2003, 2004 y 2005 para las zonas árida, semiárida y subhúmeda seca fue de sequía extrema y severa.
2. En el presente trabajo se muestra las series de tiempo ISS, ICV, ICT e ICP para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca de la región Piura, región Lambayeque y región Cajamarca, se concluye que la sequía afecta a las tres zonas de aridez de las tres regiones en los años 2004 y 2005 en la cual indican una sequía moderada, severa y extrema donde los valores son menores a 0.4.
3. Para la evaluación del ISS con el IPE3 que es el índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses, IPE3 se calcula a partir de los datos de precipitación de estaciones meteorológicas. La correlación del ISS con el IPE3, en la zona árida es de 0.43, en la zona semiárida es de 0.66 y en la zona subhúmeda seca es de 0.54. Este resultado demuestra que el nuevo método de seguimiento de la sequía es la integración de múltiples fuentes de datos de teledetección es un índice integral de vigilancia de la sequía, contiene la información de sequía meteorológica.
4. En la zona árida el ISS y el ICV presentaron valores de correlación de 0.43 y 0.46 con el IPE3 respectivamente, por tanto son los mejores índices que identifica la sequía en la zona árida. En la zona semiárida el ISS y el ICT presentaron valores altos de correlación 0.66 y

0.67 con el IPE3 respectivamente, por tanto son excelentes índices que indica la sequía en la zona semiárida. En la zona subhúmeda seca los índices ISS, ICT e ICV presentaron valores de correlación de 0.54, 0.63 e 0.61 con el IPE3 respectivamente, por tanto son los índices adecuados para identificar la sequía en la zona subhúmeda seca. En la zona subhúmeda húmeda el ICT presenta el valor de correlación de 0.57 con el IPE3, es el índice adecuado para identificar la sequía en la zona subhúmeda húmeda. Y en la zona húmeda el ICT presenta el valor de correlación de 0.45 con el IPE3, es el índice adecuado para identificar la sequía en la zona húmeda.

5. Mientras para la zona hiperárida los índices tales como: ISS, ICP, ICT e ICV presentaron valores de correlación de 0.22, 0.38, 0.12 y 0.27 con el IPE3 respectivamente, por tanto ninguno son los adecuados para la identificación de la sequía en la zona hiperárida.

## **7.2. Recomendaciones**

1. Se recomienda para una investigación posterior también incluir información sobre la humedad del suelo para poder evaluar el inicio, la duración, el alcance y la gravedad de la sequía.
2. Se recomienda a SENAMHI implementar datos in-situ de temperatura superficial del suelo.
3. Incorporar datos PISCO – SENAMHI precipitación.
4. Incorporar datos de caudal de las cuencas hidrográficas para cada zona de aridez.
5. Incluir las series histórica de producción y superficie cosechada del MINAGRI a escala local.
6. Evaluar la capacidad de pronóstico de los impactos en la vegetación durante sequías extremas. Incendios forestales.
7. Estudiar patrones de circulación atmosféricos que controlan la variabilidad de las lluvias.



## REFERENCIAS

1. Abramowitz M, Stegun A, (1965) *Handbook of Mathematical formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, inc.: New York.
2. Abrams, M., y S. Hook. (1998). ASTER User Handbook, Version 1, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, pp.13-26.
3. Acuña, J., Felipe, O., Ordoñez, J., y Arboleda, F., 2011, Análisis Regional de Frecuencia de Precipitación Anual para la Determinación de Mapas de Sequías. Revista Peruana Geo Atmosférica. (3), 104-115.
4. Aguilar Lome, J., 2015, Variabilidad Espacio-temporal de la Temperatura de la Superficie del Suelo en el Perú y su relación con los eventos extremos, mediante imágenes MODIS/Terra durante el periodo 2000-2012. Tesis de Maestría en Física, Mención Geofísica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú.
5. Allaby, M.H. (Ed.), 2007. Encyclopedia of Weather and Climate. Facts On File, New York.
6. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irr. & Drain. Paper 56. UN-FAO, Rome, Italy.
7. Almazroui, M., 2011. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009. Atmospheric Research 99 (3–4), 400–414.
8. Anculle Condorchoa, Tony Edgar. 2016. Modelo del inicio de la sequía en la costa norte de Perú a partir del NDVI de los sensores AVHRR, VEGETATION, MODIS y los datos ENOS (1982-2013). Tesis de Maestría en Física, Mención Geofísica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú.
9. Amita Mehta., 2015. Gestión de recursos Hídricos Usando Datos de la Ciencia Terrestre de la NASA. Curso en línea de percepción remota de la Nasa (ARSET).
10. AMS, 2004. American Meteorological Society. Statement on meteorological drought. Bull. Am. Meteorol. Soc. 85, 771–773.  
<https://www.highbeam.com/doc/1P3-654400081.html>  
<https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/archive-statements-of-the-ams/meteorological-drought/>  
Fecha de acceso: 30 de enero de 2017
11. Badaracco, M. R. R., 2014, Distribución Espacial de la Conductividad Eléctrica del Suelo de la Región de Lambayeque Usando Imágenes de los Satélites Landsat 5 y 7 Mediante Redes Neuronales Artificiales: Perceptrón Multicapa. Tesis de Maestría en Física, Mención Geofísica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú.

12. Bai, Z. G., D. L. Dent, H. Bartholomeus and M. E. Schaepman (2005), Assessing land degradation and improvement using NASA GIMMS, Shaanxi, China, Remote sensing and geoinformation processing in the assessment and monitoring of land degradation and desertification, Trier, Germany, pp. 128-135.
13. Barbosa, H. A., Lakshmi Kumar, T. V., Silva, L. R. M., 2015, Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall. Springer Science, DOI 10.1007/s11069-015-1635-8.
14. Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Martínez, A., 2010. A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase – a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. Bulletin of the American Meteorological Society 91 (10), 1351–1356.
15. Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N., 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 8 (4), 289–302.
16. Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J., Reed, B.C., 2008. The vegetation drought response index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. GIScience & Remote Sensing 45 (1), 16–46.
17. Chang, T.J., Kleopa, X.A., 1991. A proposed method for drought monitoring. Water Resour. Bull. 27, 275–281.
18. Chang, T.J., Stenson, J.R., 1990. Is it realistic to define a 100-year drought for water management? Water Resour. Bull. 26 (5), 823–829.
19. Chávez Jara Steven Paul., 2013. Caracterización de tormentas en el Valle del Mantaro mediante Sensoramiento Remoto. Tesis para optar el título de licenciado en física. Pontifica Universidad Católica del Perú.
20. Chen, J., Jonsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. Remote Sensing of Environment 91 (3–4), 332–344.
21. Ciencias de la Tierra Goddard de Datos y Servicios de Información del Centro (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>) Descarga de las imagen TRMM 3B43 (Fecha de acceso 03/2014).
22. Clausen, B., Pearson, C.P., 1995. Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. J. Hydrol. 173, 111–130.
23. Dai, A. 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (1): 45-65.

24. Deng, J.S., Wang, K., Deng, Y.H., Qi, G.J., 2008. PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 29 (16), 4823–4838.
25. Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G., 1980. On the statistical characteristics of drought events. *Water Resour. Res.* 16 (2), 289–296.
26. Du, L., Tian, Q., Huang, Y., Liu, J., 2012. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 28 (2), 121–126 (in Chinese).
27. Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y., 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, 245–253.
28. Edwards DC, McKee TB, (1997) *Characteristic of 20th century drought in the United States at multiple timescales*. Colorado State University: Fort Collins, Climatology Report No 92–2.
29. Eltahir, E.A.B., 1992. Drought frequency analysis of annual rain-fall series in Central and Western Sudan. *Hydrological Sci. J.* 37 (3), 185–199.
30. Estrela, M.J., Penarrocha, D., Milla´ n, M., 2000. Multi-annual drought episodes in the Mediterranean (Valencia region) from 1950–1996. A spatio-temporal analysis. *Int. J. Climatol.* 20, 1599–1618.
31. FAO (Food and Agriculture Organization), 1983. Guidelines: Land evaluation for Rainfed Agriculture. FAO Por sus siglas en ingles (Food and Agriculture Organization) Soils Bulletin 52, Rome.
32. FAO. 2000a. *Land resource potential and constraints at regional and country levels*. World Soil Resources Report No. 90. Rome.
33. FAO. 2008. *Water and Cereals in Drylands*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan. Rome.
34. Ferraro, S.A., Curutchet, G., Tasat, D.R. 2009. Impacto biológico adverso sobre las vías respiratorias inducido por material particulado proveniente de sedimentos del Río Reconquista. En: Lucas Fernández Reyes, Alejandra V. Volpedo y Alejo Pérez Carrera (Eds), *Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 190–199. ISBN: 978-987- 96413-9-2.
35. Frick, D.M., Bode, D., Salas, J.D., 1990. Effect of drought on urban water supplies. I: drought analysis. *J. Hydrological Eng.* 116, 733–753.
36. Gallo, K., Ji, L., Reed, B., Dwyer, J., Eidenshink, J., 2004. Comparison of MODIS and AVHRR 16-day normalized difference vegetation index composite data. *Geophysical Research Letters* 31 (7), <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL019385> [L07502].

37. Galván Ortiz, Luis Manuel. 2011. Impacto de la Sequía Meteorológica en la Vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982 - 2006). Tesis para optar el Grado de Maestro en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
38. García Marín, R. (2008). Riesgo de Sequía y Vulnerabilidad Socioeconómica en la Cuenca del Guadalentín. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia, pp 67.
39. GES DISC. 2015. (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)). Readme for TRMM Product 3B43 (V7). Accedido (10/02/2016): ([http://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM\\_L3/TRMM\\_3B43/doc/TRMM\\_Readme\\_v3.pdf](http://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43/doc/TRMM_Readme_v3.pdf))
40. Gonzalez, R., and R. Woods. 2002. Digital image processing. Prentice-Hall. New Jersey.
41. GR-C, 2011. Gobierno Regional de Cajamarca – Geomorfología del departamento de Cajamarca. Elaborado por Ing. Germán H. Alcántara Boñón 2010-2011, pp 1-47.
42. Graig Rodarmel and Jie Shan, 2002. Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Classification. Surveying and Land Information Science, Vol. 62, No. 2, pp.115-123.
43. Guiseppe R., Vega T. y Bonaccorso B. 2007. Methods and Tools for Drought Analysis and Management. Water Science and Technology Library. VOLUME 62. *Editorial Advisory Board*.
44. Guttman, N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. J. Am. Water Resour. Assoc. 34 (1), 113–121.
45. Guttman, N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. Journal of the American Water Resources Association 35 (2), 311–322.
46. Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A., Vanyarkho, O.V., 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society 80 (3), 429–438.
47. Heim, R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society 83 (8), 1149–1166.
48. Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B., Schneider, U., 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. Bulletin of the American Meteorological Society 78 (1), 5–20.
49. Huffman, G.J., Adler, R.F., Rudolf, B., Schneider, U., Keehn, P.R., 1995. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information. Journal of Climate 8 (5), 1284–1295.

50. INDECI. 2004. Instituto Nacional de Defensa Civil– Proyecto INDECI – PNUD PER/02/051 Ciudades Sostenibles. “Plan de Usos del Suelo y Medidas de Mitigación Ante Desastres Ciudad de Lambayeque”.
51. INDECI. 2005. Instituto Nacional de Defensa Civil – Proyecto INDECI – PNUD PER/02/051 Ciudades Sostenibles. “Programa de Prevención y Medidas de Mitigación ante Desastres de la Ciudad de Cajamarca”
52. INDECI. 2014, Instituto Nacional de Defensa Civil, “*Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres- PLANAGERD 2014 – 2021*”, Perú
53. Jackson R. D., y A. R. Huete (1991), Interpreting vegetation indices, Preventive veterinary medicine, 11, 185-200.
54. Jain, S.K., Keshri, R., Goswami, A., Sarkar, A., Chaudhry, A., 2009. Identification of drought-vulnerable areas using NOAA AVHRR data. International Journal of Remote Sensing 30 (10), 2653–2668.
55. Kogan, F.N., 1995a. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research 15 (11), 91–100.
56. Kogan, F.N., 1995b. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorological Society 76 (5), 655–668.
57. Kogan, F.N., Sullivan, J., 1993. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. Advances in Space Research 13 (5), 219–222.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027311779390548P>  
[http://www.researchgate.net/publication/222391860\\_Development\\_of\\_global\\_drought-watch\\_system\\_using\\_NOAAVHRR\\_data](http://www.researchgate.net/publication/222391860_Development_of_global_drought-watch_system_using_NOAAVHRR_data)
58. Kogan, F.N., Yang, B., Wei, G., Zhiyuan, P., Xianfeng, J., 2005. Modelling corn production in China using AVHRR-based vegetation health indices. International Journal of Remote Sensing 26 (11), 2325–2336.
59. Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., Simpson, J., 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 15 (3), 809–817.
60. Lasaponara, R., 2006. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. Ecological Modelling 194 (4), 429–434.
61. Lindsay I. Smith. 2002. A Tutorial on Principal Components Analysis. pp 1- 26.
62. Linsley Jr., R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., 1958. Hydrology for Engineers. McGraw Hill, New York.

63. Liu, W.T., Juarez, R.I.N., 2001. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 22 (17), 3483–3501.
64. Lloyd-Hughes B, Saunders M.A. 2002 A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22, 1571–1592.
65. Lotsch A, Friedl M, Anderson B, Tucker C (2003) Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. *Geophys Res Lett* 30:1774
66. Mas, J.F. (2011). Taller: Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.12-21.
67. McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.
68. McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 233–236.
69. MINAM. 2009. Servicios ambientales sustentables: adaptación al cambio climático para asegurar las fuentes de agua. Presentación en diapositivas realizada en setiembre de 2009. Lima.
70. MINAM., 2011. La Desertificación en el Perú. Cuarta comunidad Nacional del Perú a la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Lima. 74 pp.
71. MINAM. 2012. Mapas de tierras secas del Perú. 32 pp.
72. MINAM., 2015. Mapa Nacional de Cobertura Vegetal - Memoria descriptiva. 105pp.
73. Mishra, A.K., Singh, V.P., 2009. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *J. Geophys. Res.* 114, D06120. doi:[10.1029/2008JD010986](https://doi.org/10.1029/2008JD010986).
74. Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391, 202-216.
75. Mohan, S., Rangacharya, N.C.V., 1991. A modified method for drought identification. *Hydrological Sci. J.* 36 (1), 11–21.
76. MRTWeb (<http://mrtweb.cr.usgs.gov>) Fecha de acceso 01/2014.
77. National Drought Mitigation Center (NDMC), 2006: What is Drought? Understanding and Defining Drought. University of Nebraska-Lincoln.

78. Ntale, H.K., Gan, T.Y., 2003. Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology* 23 (11), 1335–1357.  
[http://www.researchgate.net/publication/229514337\\_Drought\\_indices\\_and\\_their\\_application\\_to\\_East\\_Africa](http://www.researchgate.net/publication/229514337_Drought_indices_and_their_application_to_East_Africa)
79. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONURRD). 2012. Impacts of Disasters Since the 1992 Rio de Janeiro Earth Summit. Disponible en: [http://www.unisdr.org/files/27162\\_2012no21.pdf](http://www.unisdr.org/files/27162_2012no21.pdf)
80. Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1986. Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985, WMO, Geneva, p. 118.
81. Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1990. Glossary of terms used in agrometeorology. CAGM No. 40. WMO/TD-No. 391. Geneva.  
[http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/publications/cagm\\_reports.php](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/publications/cagm_reports.php) (revisado 01/10/2015)
82. Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2012. El tiempo, el clima y el agua, motores de nuestro futuro. OMM-N° 1084, 40 p. ISBN: 978-92-31084-2.
83. Pauluis, O., & Dias, J. (2012). Satellite Estimates of Precipitation-Induced Dissipation in the Atmosphere. *Science*, 335(6071), 953–956.
84. PRPAD – Región de Piura. 2005. Plan Regional de Prevención y Atención de Desastres de la Región Piura, 2005. 64p.
85. RAE. 2015. Definición de sequía. <http://www.rae.es/> (revisado 01/03/2015)
86. Rahman H., y G. Dedieu (1994), SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurement in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 123-14.
87. Ramos Fernández, Lia., 2013. Estudio de la utilidad de la Lluvia Estimada de Satélite en la Modelación Hidrológica Distribuida. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
88. Rhee, J., Im, J., Carbone, G.J., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 114, 2875–2887.
89. Richards, J.A., Jia, X., 2013. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
90. Rivera, Juan Antonio. 2014. Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el Área de la Atmosfera y los Océanos. Buenos Aires-Argentina. Pp 352.

91. Rojas J., E. Rufasto, C. Eche, y F. Carrillo., 2009, Modelo del Inicio de la Sequía en la Costa Norte de Perú Usando los Índices ENOS y los Índices de Vegetación del AVHRR/NOAA, Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, 5055-5063.
92. Rouse J. W. (1974), Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFCT, Greenbelt, MD, USA, 12.1.1.
93. Schowengerdt, R. 2006. *Remote sensing: Models and methods for image processing*, 3rd ed. Academic Press. London. USA pp.193.
94. Secretaría General de las Naciones Unidas, 1994. United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa. Paris.
95. SIGMINAM. 2011. Sistema de Información Geografía Del Ministerio del Medio Ambiente. Mapa de Ecorregiones del Perú. Autor: Dr. Antonio Brack Egg. <http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/maps.aspx>
96. Singh, R.P., Roy, S., Kogan, F., 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing* 24 (22), 4393–4402.  
  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000084323?journalCode=tres20#.U6no3fmSx1Y>
97. Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). Teledetección. España: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia.pp.19.
98. Soca Flores, R., 2015. Identificación de Tierras Degradadas por Salinidad del Suelo en los Cultivos de Caña de Azúcar en Pomalca usando Imágenes de Satélite. Tesis de Maestría en Física, Mención Geofísica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
99. Taylor, R. (1990), Interpretation of the correlation coefficient: a basic review, *JDMS*, 1, 35-39.
100. Thom H.C.S. 1958. A note on the Gamma distribution. *Monthly Water Review* 86 vol. 4 117–122.
101. Tipler, A. P. and Llewellyn, A. R. (2000). *Modern Physics*. USA: Freeman.
102. Torres, J. 2010. *Desertificación y cambio climático*. Ponencia presentada en el Simposio Eventos Hidrometeorológicos Extremos y Cambio Climático en el Perú, Lima 24 -25 marzo 2010, organizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.



103. Tucker, C., D'Souza, D., 1996. History of the use of AVHRR data for land applications. In: Souza, G.D., Selward, A.S., Malingreau, J.P. (Eds.), *Advances in the Use of NOAA-AVHRR Data for Land Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 1–19.
104. TRMM, 2016. Precipitation Processing System Tropical Rainfall Measuring Mission File Specification for TRMM Products Version 7.004. may 29, 2016
105. Udelhoven, T., Stellmes, M., del Barrio, G., Hill, J., 2009. Assessment of rainfall and NDVI anomalies in Spain (1989–1999) using distributed lag models. *International Journal of Remote Sensing* 30 (8), 1961–1976.  
[http://www.researchgate.net/publication/248978109\\_Assessment\\_of\\_rainfall\\_and\\_NDVI\\_anomalies\\_in\\_Spain\\_\(1989-1999\)\\_using\\_distributed\\_lag\\_models](http://www.researchgate.net/publication/248978109_Assessment_of_rainfall_and_NDVI_anomalies_in_Spain_(1989-1999)_using_distributed_lag_models)
106. UNCCD, 2000. *An introduction to the United Nations Convention to combat desertification* (available at <http://www.unccd.int>).
107. Unganai, L.S., Kogan, F.N., 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* 63 (3), 219–232.
108. Vicente-Serrano, S.M., 2007. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. *Natural Hazards* 40 (1), 173–208.  
[http://www.researchgate.net/publication/226088113\\_Evaluating\\_the\\_Impact\\_of\\_Drought\\_Using\\_Remote\\_Sensing\\_in\\_a\\_Mediterranean\\_Semi-arid\\_Region](http://www.researchgate.net/publication/226088113_Evaluating_the_Impact_of_Drought_Using_Remote_Sensing_in_a_Mediterranean_Semi-arid_Region)
109. Vogel, R.M., Kroll, C.N., 1992. Regional geohydrologic–geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resour. Res.* 28 (9), 2451–2458.
110. Wan, Z. (1999), MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD): Version 3.3. Santa Barbara: University of California.
111. Wan, Z., Dozier, J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving landsurface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34 (4), 892–905.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=508406&abstractAccess=no&userType=inst](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=508406&abstractAccess=no&userType=inst)
112. Webster, K.E., Kratz, T.M., Bowser, C.J., Adagnuson, J.J. 1996. The influence of landscape position on lake chemical responses to drought in Northern Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* **41** (5): 977-984.
113. White, D.H., Walcott, J.J. 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science* **60**: 599-616.
114. Wilhite, D.A., Svoboda, M.D. 2000. Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. En: Wilhite, D.A, Sivakumar, W., Wood, D.A (eds.). *Proceedings of an expert group meeting in Early Warning Systems for drought preparedness and drought management*.

115. Wilks, D.S. (2011) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Third edition ACADEMIC PRESS.
116. Yao, Y., Liang, S., Qin, Q., Wang, K., Zhao, S., 2011. Monitoring global land surface drought based on a hybrid evapotranspiration model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13 (3), 447–457.
117. Zecharias, Y.B., Brutsaert, W., 1988. The influence of basin morphology on groundwater outflow. *Water Resour. Res.* 24 (10), 1645–1650.
118. ZEE, 2012. La Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de la Región de Piura, 2008-2012. Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente del Gobierno Regional Piura, pp 1-255.
119. Zelenhasic, E., Salvai, A., 1987. A method of streamflow analysis. *Water Resour. Res.* 23, 156–168.
120. Zhao, M.S., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329 (5994), 940–943.

## ANEXO A

### A.1. Terminología del ACP

<b>TABLA A.1.</b> Una guía parcial a la terminología sinónimo asociado con ACP (Lindsay, 2002).			
Eigenvectores, $e_m$	Elementos del Eigenvector $e_{k,m}$	Componentes Principales, $u_m$	Elementos Componentes Principales
EOFs	Loadings = Pesos	Las Variables Ortogonales Empíricas	Puntajes
Modos de Variación	Coeficientes		Amplitudes
Vectores de Patrón	Coeficientes de Patrones		Coeficientes de Expansión
Ejes Principales	Pesos Ortogonales Empíricas		Coeficientes
Vectores Principales			
Funciones Propias			
Direcciones Principales			

## **REFERENCIA ANEXO A**

121. Lindsay I. Smith. 2002. A Tutorial on Principal Components Analysis. pp 1- 26.

### B.1. Plataformas satelitales y sensores pasivos y activos

En el presente apartado se realiza una descripción de las características del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA y así como una descripción de las características del radar de precipitación del satélite TRMM.

La teledetección se lleva a cabo a través de los sensores, instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada y emitida) que les llega de la tierra y la atmósfera y convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada. Los sensores convierten la señal electromagnética en un formato analógico (fotografía) o digital (imagen). Para llevar a cabo la observación del terreno, los sensores se ubican en plataformas, fijas o móviles: mástiles, grúas, globos, aviones, cohetes o satélites. Las características de la imagen registrada dependen en gran medida de las propiedades del sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición de datos.

Los sensores se agrupan en dos grupos: *métodos pasivos* y *métodos activos* (Sobrino, 2000).

**Los métodos pasivos** se basan en la detección de las características radiativas o reflectantes del sistema observado, es decir, el sensor cumple la misión de registrar la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Son sensores pasivos las cámaras de fotos, los radiómetros y los sistemas de video. **Los métodos activos** son aquellos en los que el sensor cumple una doble función ya que actúa activamente produciendo una señal (onda electromagnética) de características conocidas que posteriormente registrara después de interactuar con el sistema observado. La información obtenida procede de la comparación entre la señal emitida y la señal reflejada. Son sensores activos el radar y el lidar (Sobrino, 2000).

#### 1.1. SENSOR MODIS

##### 1.1.1. PROGRAMA EOS (Earth Observation System)

Este programa de la NASA consiste en el desarrollo y puesta en operación de una serie de satélites polares que tienen como objetivo la observación a largo plazo de la superficie terrestre, la atmósfera, el océano y la biosfera para disponer de la información necesaria para analizar las causas y los efectos del cambio planetario. Destacan tres misiones: TERRA; AQUA y EOS-CHEM. El satélite TERRA, denominado formalmente EOS-AM1 tiene previsto su lanzamiento el 16 de diciembre de 1999, AQUA en enero del 2001 y EOS-CHEM en 2002 (Abrams y Hook, 1998).

### 1.1.2. Características generales del satélite TERRA

El satélite TERRA fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 como parte del programa Earth Observing System (EOS) de la NASA, y tiene por objetivo principal adquirir datos que permitan aumentar los conocimientos sobre la dinámica global de la atmósfera, la interacción tierra, océano y atmósfera (Abrams y Hook, 1998).

Una de las características más importante del satélite, es el tipo de órbita que esta describe. La órbita que sigue este satélite, es cuasi-polar y Helio - sincrónica. Estas dos características son llamadas de esta manera como consecuencia del tipo de movimiento que realiza el satélite en torno a la Tierra. Se le denomina polar porque su plano es prácticamente paralelo al eje de rotación terrestre con un inclinación de  $98.2^{\circ} \pm 0.15^{\circ}$ , respecto al ecuador terrestre, es decir el satélite da vueltas de polo a polo, de forma que es la Tierra la que al girar hace que aquel vaya cubriendo progresivamente a lo largo de su vuelo toda la superficie terrestre, Tabla B.1.

<b>Misión</b>	<b>Earth Observing System (EOS)</b>
<b>Institución Responsable</b>	NASA
<b>País / Región</b>	Estados Unidos
<b>Satélite</b>	TERRA
<b>Lanzamiento</b>	18/12/1999
<b>Situación Actual</b>	Activo
<b>Órbita</b>	Polar e heliosíncrona
<b>Altitud</b>	705 km.
<b>Inclinación</b>	98.2°
<b>Tiempo de Duración de la órbita</b>	98.1 min.
<b>Horario de Paso</b>	10:30 A.M.
<b>Período de Revisita</b>	16 días
<b>Sensores</b>	ASTER, MODIS, MISR, CERES e MOPIT

**Tabla B.1.** Características del Satélite TERRA (Abrams y Hook, 1998).

Una característica muy importante en la obtención de parámetros de la superficie terrestre es la geometría de la iluminación solar. Es por ello que los satélites sobrevuelan el mismo punto de la Tierra a la misma hora (Abrams y Hook, 1998).

### 1.1.3. Organización espacial

Dependiendo del nivel de procesamiento, los productos MODIS presentan diferentes formas de organización espacial. Cada cuadro, llamado *tile*, se localiza por un número de columna (h) y línea (v). Así

por ejemplo la parte continental del territorio peruano está cubierta en su totalidad por los mosaicos h09v09, h10v09, h11v09, h10v10, h11v10. En la figura B.1 se presenta la retícula de mosaicos MODIS, donde 188 cuadros indicados en blanco no contienen información y los 134 cuadros azules indican 100% de agua (Mas F.J, 2011).

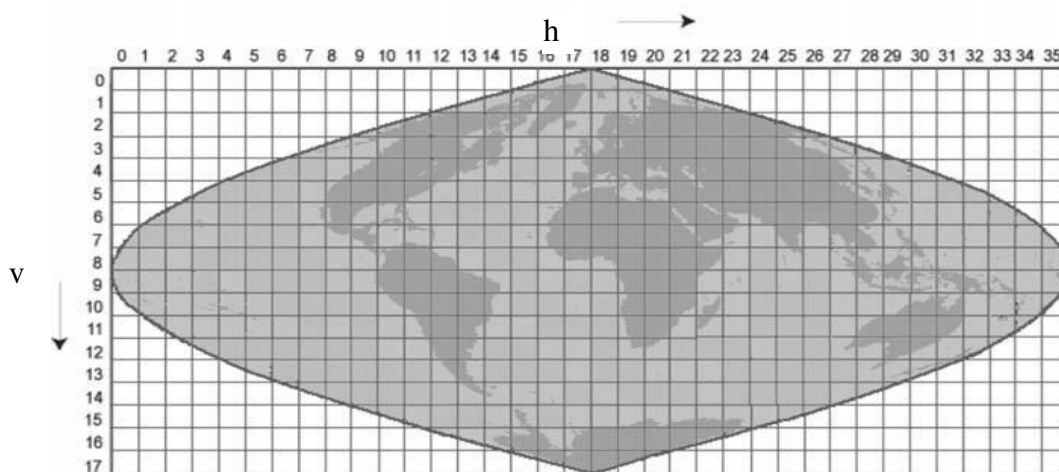


Figura B.1. Organización de los productos Modland en tiles (Mas F.J, 2011).

Finalmente, algunos productos, llamados Malla de Modelado Climático (Climate Modeling Grid, CMG por sus siglas en inglés), representan toda la superficie terrestre a una resolución espacial baja ( $0.05^\circ$  que corresponden a 5600 m aproximadamente) en proyección geográfica (Mas F.J, 2011).

#### 1.1.4. Identificación de los productos

Los productos MODIS se nombran a través de la convención adoptada por la NASA. Las diferentes porciones del nombre del archivo permiten conocer la plataforma, el nombre del producto, su fecha de adquisición, versión y localización (Tabla B.2.).

MOD13A2.A2003033.h13V12.005.2003057233623.hdf	
MOD	Identificación de la Plataforma MOD-Terra, MYD- Aqua
13A2	Número del producto (Índice de Vegetación 16 días 1km)
A2003033	Datos de adquisición (año 2003, día juliano 033)
h13v12	Posición de la imagen en la grilla horizontal (13 horizontal y 12 vertical)
005	Código de procesamiento
2003057233623	Datos de procesamiento: Año 2003, día juliano 057, horario (HH:MM:SS) 23:36:23

Tabla B.2. Identificación de los productos (Mas F.J, 2011).

### **1.1.5. Sensores a bordo del satélite TERRA**

**ASTER** (Radiómetro espacial de emisión y reflexión térmica avanzado), proporciona imágenes en alta resolución de la superficie del suelo, agua, hielo y nubes utilizando tres subsistemas de sensores que cubren 14 bandas espectrales desde el visible hasta el infrarrojo térmico (Abrams y Hook, 1998).

**CERES** (Medidor de nubes y del sistema de radiación de Energía de la Tierra), mide el balance de radiación de la Tierra y la radiación atmosférica de la cima de la atmósfera usando un radiómetro de barrido de banda ancha (Abrams y Hook, 1998).

**MISR** (Radiómetro espectral con imágenes multiangulares), mide las funciones de reflectancia angular de la cima de la atmósfera, nubes y superficie, y mide la función de reflectancia bidireccional de la superficie (BRDF), aerosol y propiedades de la vegetación usando 4 bandas espectrales en cada una de sus nueve cámaras orientadas en diferentes ángulos (Abrams y Hook, 1998).

**MODIS** (Radiómetro espectral con imágenes de resolución moderada), mide los procesos biológicos y físicos en el suelo y el océano usando un radiómetro de barrido multiespectral con 36 bandas espectrales desde el visible al infrarrojo térmico. Con estos instrumentos se puede medir la temperatura de la superficie terrestre, composición de la nieve y el suelo, identificación de minerales, albedo aerosoles atmosféricos, evapotranspiración y un sin fin de características de la vegetación (Abrams y Hook, 1998).

**MOPIT** (Mediciones de la contaminación en la tropósfera), mide los perfiles verticales de monóxido de carbono y posiblemente el metano en la tropósfera usando correlación espectroscópica con celdas de gas moduladas por presión y moduladas por longitud (Abrams y Hook, 1998).

### **1.1.6. Sensor MODIS-TERRA**

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002).

La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de  $98.2^\circ$  y  $98^\circ$  y una altitud media de 708 y 705 km, respectivamente (MODIS Web. Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, fecha de acceso 20/08/2014). Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana hora local en su órbita descendente, mientras que AQUA pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde hora local. Las primeras imágenes captadas por Terra se obtuvieron en Febrero del año 2000. Ambas plataformas monitorean la totalidad de la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud.



El instrumento MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales, en un rango de longitud de onda que va de los 0.4  $\mu\text{m}$  a los 14.4  $\mu\text{m}$ , Tabla B.3.

<b>Especificaciones generales del sensor MODIS</b>	
<b>Orbita</b>	Altitud: 708km (Terra) y 705km (Aqua), pasando en el ecuador a 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) y a las 1:30p.m.; nodo ascendente (Aqua), heliosincrona, casi polar, circular.
<b>Tasa de escaneo</b>	20,3rpm, ortogonal a la órbita
<b>Dimensiones de la franja escaneada</b>	2,330 km(ortogonal) por 10 km(a lo largo de la órbita del nadir)
<b>Telescopio</b>	17,78 cm diámetro con planos de desvío intermediarios
<b>Tamaño</b>	1,0x1,6x1,0 m
<b>Peso</b>	228,7kg
<b>Poder</b>	162,5W(promedio orbital)
<b>Tasa de transferencia de datos</b>	10.6Mbps(pico);6,1Mbps(promedio orbital)
<b>Codificación</b>	12bits
<b>Resolución espacial</b>	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
<b>Vida útil</b>	6 años

**Tabla B.3.** Especificaciones generales del sensor MODIS (MODIS Web. Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, Fecha de acceso 20/08/2014).

Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 0.405nm y 2.155nm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas, Tabla B.4. Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de (3.660-14.385nm). (MODIS Web. Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, Fecha de acceso 20/08/2014). Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de 250 m al nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1km, Tabla B.5. MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (error RMS inferior a 50 m) (Mas J.F, 2011).

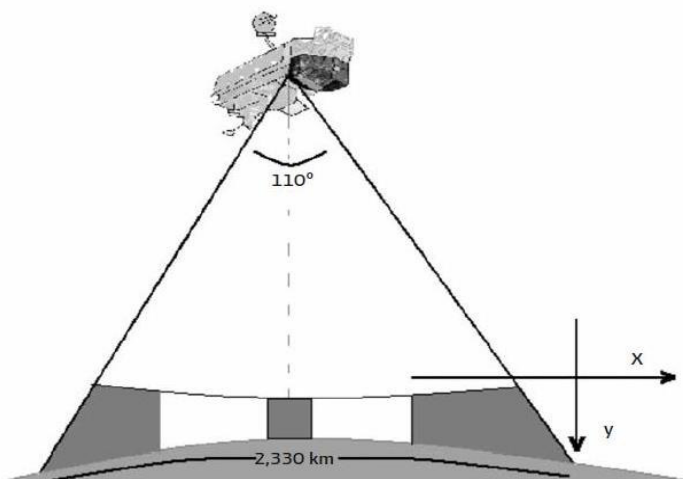
Uso principal	Banda	Rango Espectral (nm)
<b>Límites de Tierra /Nubes/aerosoles</b>	1	620-670
	2	841-876
<b>Propiedades de Tierra /Nubes/aerosoles</b>	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155
<b>Color del océano/fitoplancton/ biogeoquímica</b>	8	405-420
	9	438-448
	10	483-493
	11	526-536
	12	546-556
	13	662-672
	14	673-683
	15	743-753
	16	862-877
<b>Vapor de agua atmosférico</b>	17	890-920
	18	931-941
	19	915-965

**Tabla B.4.** Características de las primeras 19 bandas espectrales del sensor MODIS (MODIS Web. Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, fecha de acceso 20/08/2014)

El sensor MODIS es un explorador de barrido: un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria del satélite con un ángulo de  $\pm 55^\circ$  respecto del nadir que permite explorar una franja de terreno (swath) a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2330 km (Figura B.2). El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera de su eje focal que direccionan la radiación incidente a cuatro sistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral (visible, infrarrojo cercano, medio y térmico). Para las bandas del visible y del infrarrojo cercano se utiliza una nueva tecnología de fotodiodos de silicio. Para el infrarrojo térmico se usan detectores de Telureto de Mercurio-Cadmio (HgCdTe) (Mass J.F, 2011).

Uso principal	Banda	Rango Espectral (nm)
Temperatura / Superficie/Nubes	20	3.660-3.840
	21	3.929-3.989
	22	3.929-3.989
	23	4.020-4.080
Temperatura atmosférica	24	4.433-4.498
	25	4.482-4.549
Vapor de agua de Nubes Cirrus	26	1.360-1.390
	27	6.535-6.895
	28	7.175-7.475
Propiedades de las Nubes	29	8.400-8.700
Ozono	30	9.580-9.880
Temperatura /Superficie/Nubes	31	10.780-11.280
	32	11.770-12.270
Altitud de las nubes	33	13.185-13.485
	34	13.485-13.785
	35	13.785-14.085
	36	14.085-14.385

**Tabla B.5.** Características de las siguientes 17 bandas espectrales del sensor MODIS Web (Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, 20/08/2014).



**Figura B.2.** Ángulo de visión del sensor MODIS (Mas J.F, 2011)

## 1.2. TRMM

### 1.2.1 Descripción general del TRMM.

El TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) constituye una misión conjunta japonesa-estadounidense dedicada a la observación y comprensión del funcionamiento de la lluvia en las regiones tropicales y

subtropicales (donde se produce 2/3 del total de la precipitación mundial), uno de los parámetros más importantes y menos conocidos del cambio climático. El satélite TRMM proporcionara medida a largo plazo de la lluvia y de la energía radiada desde la tierra. Fue puesto en órbita en noviembre de 1997 y lleva 5 instrumentos: *un radar de precipitación* que por primera vez recoge precipitación sobre el océano, *un radiómetro visible-infrarojo*, *un sensor de microondas*, *un sensor que registra la energía procedente de la tierra y de las nubes* y *un sensor detector de relámpagos*. En la actualidad, la calidad y cantidad de los datos proporcionados excede ya las expectativas por lo que está resultando de gran interés para la comunidad científica. (Sobrino, 2000)

La información registrada por los sensores a bordo del satélite TRMM incluido el radar de precipitación ha sido dispuesta por la NASA Earth Data en tres niveles, los cuales se distinguen por el procesamiento que se le ha hecho a las mediciones. A continuación se dará una breve descripción de los productos del radar de precipitación. Entre los productos del nivel 1 tenemos el producto 1B21 que convierte los conteos del eco registrados por el radar en la potencia de eco de radar y en potencia de ruido. El producto 1C21 calcula el factor de reflectividad del radar a partir de la potencia usando la ecuación del radar. En nivel 2 tenemos el producto 2A21 que calcula la atenuación de camino que luego es usada en el producto 2A25 para calcular la atenuación del factor de reflectividad, así también tenemos el producto 2A23 que clasifica la lluvia por tipos (se describe más adelante) y el producto 2A25 que proporciona, entre otras variables, el factor de reflectividad corregido cerca de la superficie y un estimado de la lluvia en la superficie a una resolución de 0.04°.

Finalmente están los productos del nivel 3, algunos de ellos utilizan una combinación de distintos sensores y de distintos satélites y nos dan las estadísticas de la precipitación mensual a una resolución de 0.5° (Chavez, 2013). Uno de los productos más usados es el producto 3B43 que provee estimados de precipitación mensual a una resolución de 0.25°, pero se sabe de estudios previos (Du et al., 2012) que las correlaciones entre los estimados de lluvia del 3B43 y los pluviómetros para lluvias mensuales tienen valores muy modestos, además se sobreestiman las cantidades de lluvia ligera menores a 2 mm/hr y subestiman las cantidades medianas y grandes de lluvia mensual.

De todos los productos mencionados, para los fines de este estudio se vio por conveniente utilizar el producto 3B43 debido a su alta resolución y ya que nos permite caracterizar espacialmente la precipitación en cuanto a su extensión y nos permite conocer mejor los aspectos físicos de la precipitación para nuestra zona de estudio ver Figura B.3.

**Radar de precipitación (PR):** La PR fue el primer instrumento spacebourne diseñado para proporcionar tres - mapas tridimensionales de la estructura de la tormenta. Tiene una resolución horizontal de aproximadamente 5 km y un ancho de barrido de 247 km. Puede proporcionar perfiles verticales de la

lluvia y la nieve desde la superficie hasta una altura de 20 km y es sensible a la intensidad de la lluvia de luz de tan solo 0.7 mm/hr. (GES DISC, 2015).

**TRMM microwave imager (TMI):** La TMI es un sensor de microondas pasiva basada en el sensor especial de microondas/Imager (SSM/I). Se mide la intensidad de la radiación en 10,7, 19,4, 21,3, 37 y 85,5 GHz. (GES DISC, 2015).

**Escáner infrarrojo visible (VIRS):** La VIRS detecta la radiación en las longitudes de onda visible e infrarroja del 0,63, 1,6, 10,8, y 12 micrómetros. El VIRS tiene una resolución horizontal de 2 km y una anchura de la franja de unos 833 kilómetros.

Se muestra un cuadro resumen de las especificaciones de los instrumentos adaptados de la página web de la NASA Misiones medición de la precipitación Tabla B.6. (GES DISC, 2015).

### 1.2.2 Características de la órbita del TRMM

Estas estimaciones son reticuladas en una resolución temporal mes calendario y una banda global de 0,25° por 0,25° de resolución espacial que se extiende desde 50° latitud Sur y 50° latitud norte. Algoritmo de 3B43 se ejecuta una vez por mes calendario para producir, la tasa de precipitación mejor estimación individual y campo de estimación de precipitación-error RMS (3B43) mediante la combinación de la alta calidad fusionada cada 3 horas / IR estima con el acumulado mensual del análisis de los indicadores de lluvia Centro de Climatología Precipitación Mundial (GPCC por sus siglas en ingles Global Precipitation Climatology Centre). (GES DISC, 2015).

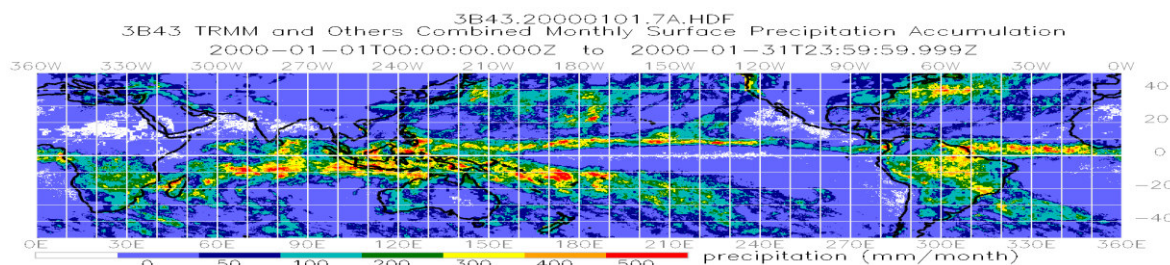
Características TRMM 3B43	
<b>La cobertura temporal</b>	Fecha de inicio: 1998-01-01 al 2015-04.
<b>Cobertura geográfica</b>	Latitud: 50°S - 50°N; Longitud: 180°W - 180°E
<b>Resolución temporal</b>	Mensual,
<b>Resolución horizontal</b>	0.25° x 0.25°; nlat = 400, nlon = 1440
<b>Normal Tamaño del archivo</b>	Comprimido: ~4.95 MB; Original: ~4.95 MB
<b>Tipo de archivo</b>	HDF

**Tabla B.6.** Características del TRMM 3B43. (GES DISC, 2015)

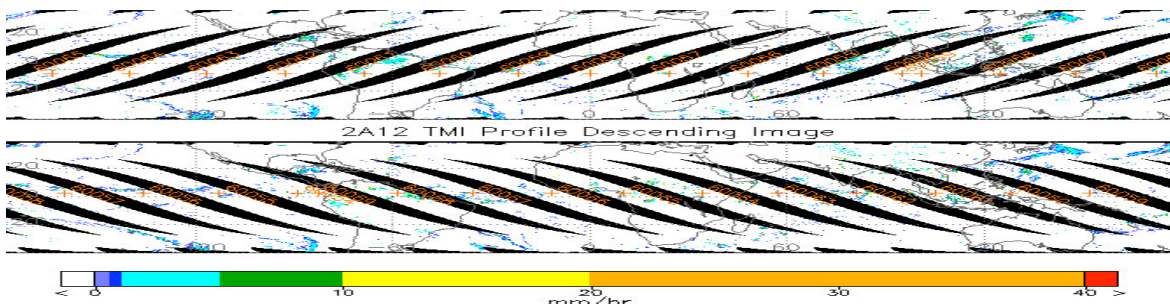
La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) es un esfuerzo de colaboración entre la NASA Ciencias de la Tierra y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). El observatorio TRMM fue lanzado en 1997 en una órbita casi circular de aproximadamente 350 kilómetros de altitud con una inclinación de 35 grados y un período de 91,5 minutos (15,7 órbitas por día). Durante agosto de 2001, la altitud TRMM se elevó a aproximadamente 402,5 kilómetros con un periodo de 92,5 minutos (15,6 órbitas por día) para ahorrar combustible y extender su vida útil. A este cambio de altitud se le conoce como el

boost, este cambio de altitud ha ampliado el ancho de la franja observada en la superficie por el radar de precipitación del satélite más conocida como swath que pasó de ser 215 km a 245 km, y también la resolución horizontal de la cobertura del haz o footprint cambió de 4.3 km a 5 km. El sistema de procesamiento de Precipitación (PPS) es el sistema de procesamiento de la información y la ciencia de datos de TRMM y GPM. La observación de la Tierra de datos del sistema y el sistema de información (EOSDIS) sirve como el archivo a largo plazo para todos los productos de datos TRMM. (TRMM, 2016)

Instrumentos múltiples se utilizan en toda la constelación satélite TRMM. Se describen brevemente a continuación. (GES DISC, 2015).



**Figura B.3** En la presente tesis se ha seleccionado TRMM 3B43 precipitación mensual acumulada ([https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM\\_L3/TRMM\\_3B43.7/2000/3B43\\_BR.20000101.7A.PNG](https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43.7/2000/3B43_BR.20000101.7A.PNG)) Fecha de acceso 10/01/2015.

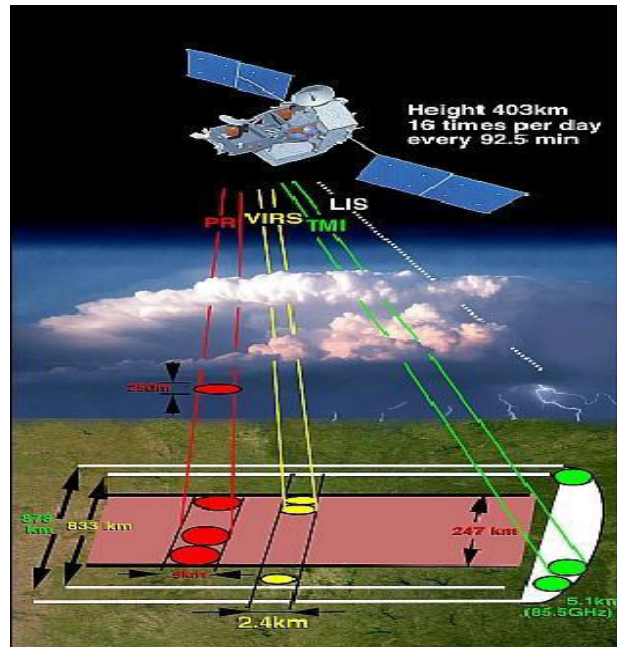


**Figura B.4** Esta es una representación de la órbita del TRMM, se muestra el swath del radar de precipitación como una delgada cinta blanca con puntos de colores, los colores representan la intensidad de la lluvia (Amita Mehta, 2015).

### 1.2.2 La geometría de escaneo del PR TRMM

El radar de precipitación escanea en la dirección transversal a su dirección de vuelo. Cada escaneo contiene 49 haces denominados rayos, los cuales corresponden a un ángulo fijo de la antena dentro de un sector angular de  $34^\circ$ , para este sector angular se forma en la superficie un swath de 245 km de ancho. El rayo 25 corresponde a la dirección del nadir, los rayos 1 y 49 corresponden al borde del swath, en los bordes del swath cada ángulo de la antena es  $\pm 17^\circ$ . El ancho de cada haz (beamwidth) es de 0.70 y el diámetro del pie de haz es de aproximadamente 5 km sobre el elipsoide de referencia. Para un rayo dado, el satélite

comienza a grabar muestras a cierto rango o distancia del satélite, con una resolución de rango de 250m la cual es igual a la resolución vertical en el nadir. El PR graba muestras para 80 niveles de altura en cada rayo, que van desde la altura del elipsoide de referencia hasta 20 km en el nadir. Cada pie de haz es de forma circular y tiene coordenadas de latitud y longitud dadas para el punto central del círculo a la altura del elipsoide de referencia (Chávez, 2013).



**Figura B.5** Geometría de escaneo actual del radar de precipitación (PR), sensor para escáner de radiación visible e infrarrojo (VIRS), sensor de microondas pasivo (TMI), sensor de imágenes de relámpago (LIS) y un sistema de energía radiante de la superficie terrestre que emplea una base de datos de imágenes de nube de altísima resolución (Ramos, 2013).

## REFERENCIAS ANEXO B

1. Abrams, M., y S. Hook. (1998). ASTER User Handbook, Version 1, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.pp.13-26.
2. Amita Mehta., 2015. Gestión de recursos Hídricos Usando Datos de la Ciencia Terrestre de la NASA. Cursillo en línea de percepción remota de la Nasa (ARSET).
3. Chávez Jara Steven Paul., 2013. Caracterización de tormentas en el Valle del Mantaro mediante Sensoramiento Remoto. Tesis para optar el título de licenciado en física. Pontifica Universidad Católica del Perú.
4. Du, L., Tian, Q., Huang, Y., Liu, J., 2012. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 28 (2), 121–126 (in Chinese).
5. Lindsay I. Smith. 2002. A Tutorial on Principal Components Analysis. pp 1- 26.
6. GES DISC. 2015. (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)). Readme for TRMM Product 3B43 (V7). Accedido (10/02/2016): ([http://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM\\_L3/TRMM\\_3B43/doc/TRMM\\_Readme\\_v3.pdf](http://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43/doc/TRMM_Readme_v3.pdf))
7. Mas, J.F. (2011). Taller: Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.12-30.
8. MODIS Web: Shannell Frazier. [Página web], consultado: 20/08/2013, <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
9. Ramos Fernández, Lia., 2013. Estudio de la utilidad de la Lluvia Estimada de Satélite en la Modelación Hidrológica Distribuida. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
10. Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). Teledetección. España: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia.pp.19.
11. TRMM, 2016. Precipitation Processing System Tropical Rainfall Measuring Mission File Specification for TRMM Products Version 7.004. may 29, 2016.



## ANEXO C

### C.1. Productos NDVI y TSS del MODIS - TERRA y precipitación del TRMM

El presente trabajo agradece a la página del MRTWeb por la descarga libre de los productos NDVI mensual (MOD13A3) (**TABLA C.1.**) y temperatura superficial del suelo (**TABLA C.2.**) de ocho días (MOD11A2) ambos con resolución de 1 km del MODIS – TERRA versión 05, ha sido descargado para el período del 2000 al 2013. Los mosaicos de h09v09 y h10v09, (Figura 4.4.) de la página web (<https://mrtweb.cr.usgs.gov/>) (Fecha de acceso 01/2014).

También el presente trabajo agradece a la página del Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, por el acceso libre a las imágenes del TRMM 3B43 que contiene los datos de precipitación mensual (**TABLA C.3.**) con resolución espacial de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  durante el periodo del 2000-2013 versión 7 (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>) (Fecha de acceso 03/2014).

Así mismo se agradece al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú por los datos proporcionados de precipitación mensual del periodo de 1970 hasta 2013, para los departamentos de Piura, Lambayeque y Cajamarca, en el área de estudio, en el **Anexo D** se realiza una descripción del tratamiento que se realizó a los datos de precipitación mensual del SENAMHI.

**TABLA C.1. Productos NDVI – MODIS – TERRA (marzo 2000 a diciembre 2013).**

[illegible]

[illegible]

**TABLA C.2. Productos TSS – MODIS – TERRA (marzo 2000 a diciembre 2013).**

FECHA	Temperatura superficial del suelo		FECHA	Temperatura superficial del suelo	
2000					
ene			jul	MOD11A2.MRTWEB.A2000185.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000193.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000201.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000209.005.LST_Day_1km.tif	
feb			ago	MOD11A2.MRTWEB.A2000217.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000225.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000233.005.LST_Day_1km.tif	
				MOD11A2.MRTWEB.A2000241.005.LST_Day_1km.tif	
mar	MOD11A2.MRTWEB.A2000065.005.LST_Day_1km.tif		sep	MOD11A2.MRTWEB.A2000249.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000073.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000257.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000081.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000265.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000089.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000273.005.LST_Day_1km.tif	
abr	MOD11A2.MRTWEB.A2000097.005.LST_Day_1km.tif		oct	MOD11A2.MRTWEB.A2000281.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000105.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000289.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000113.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000297.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000121.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000305.005.LST_Day_1km.tif	
may	MOD11A2.MRTWEB.A2000129.005.LST_Day_1km.tif		nov	MOD11A2.MRTWEB.A2000313.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000137.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000321.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000145.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000329.005.LST_Day_1km.tif	
jun	MOD11A2.MRTWEB.A2000157.005.LST_Day_1km.tif		dic	MOD11A2.MRTWEB.A2000337.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000161.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000345.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000169.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000353.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2000177.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2000361.005.LST_Day_1km.tif	
2001					
ene	MOD11A2.MRTWEB.A2001001.005.LST_Day_1km.tif		jul	MOD11A2.MRTWEB.A2001185.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001009.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001193.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001017.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001201.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001025.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001209.005.LST_Day_1km.tif	
feb	MOD11A2.MRTWEB.A2001033.005.LST_Day_1km.tif		ago	MOD11A2.MRTWEB.A2001217.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001041.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001225.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001049.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001233.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001057.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001241.005.LST_Day_1km.tif	
mar	MOD11A2.MRTWEB.A2001065.005.LST_Day_1km.tif		sep	MOD11A2.MRTWEB.A2001249.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001073.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001257.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001081.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001265.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001089.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001273.005.LST_Day_1km.tif	
abr	MOD11A2.MRTWEB.A2001097.005.LST_Day_1km.tif		oct	MOD11A2.MRTWEB.A2001281.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001105.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001289.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001113.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001297.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001121.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001305.005.LST_Day_1km.tif	
may	MOD11A2.MRTWEB.A2001129.005.LST_Day_1km.tif		nov	MOD11A2.MRTWEB.A2001313.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001137.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001321.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001145.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001329.005.LST_Day_1km.tif	
jun	MOD11A2.MRTWEB.A2001153.005.LST_Day_1km.tif		dic	MOD11A2.MRTWEB.A2001337.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001161.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001345.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001169.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001353.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2001177.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2001361.005.LST_Day_1km.tif	
2002					
ene	MOD11A2.MRTWEB.A2002001.005.LST_Day_1km.tif		jul	MOD11A2.MRTWEB.A2002185.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002009.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002193.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002017.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002201.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002025.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002209.005.LST_Day_1km.tif	
feb	MOD11A2.MRTWEB.A2002033.005.LST_Day_1km.tif		ago	MOD11A2.MRTWEB.A2002217.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002041.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002225.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002049.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002233.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002057.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002241.005.LST_Day_1km.tif	
mar	MOD11A2.MRTWEB.A2002065.005.LST_Day_1km.tif		sep	MOD11A2.MRTWEB.A2002249.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002073.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002257.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002081.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002265.005.LST_Day_1km.tif	
	MOD11A2.MRTWEB.A2002089.005.LST_Day_1km.tif			MOD11A2.MRTWEB.A2002273.005.LST_Day_1km.tif	

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]



<b>mar</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013065.005.LST_Day_1km.tif	<b>sep</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013249.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013073.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013257.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013081.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013265.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013089.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013273.005.LST_Day_1km.tif
<b>abr</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013097.005.LST_Day_1km.tif	<b>oct</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013281.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013105.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013289.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013113.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013297.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013121.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013305.005.LST_Day_1km.tif
<b>may</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013129.005.LST_Day_1km.tif	<b>nov</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013313.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013137.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013321.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013145.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013329.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013153.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013337.005.LST_Day_1km.tif
<b>jun</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013161.005.LST_Day_1km.tif	<b>dic</b>	MOD11A2.MRTWEB.A2013345.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013169.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013353.005.LST_Day_1km.tif
	MOD11A2.MRTWEB.A2013177.005.LST_Day_1km.tif		MOD11A2.MRTWEB.A2013361.005.LST_Day_1km.tif

**TABLA C.3. Imágenes de precipitación del TRMM-3B43 (marzo 2000 a diciembre 2013).**

FECHA	TRMM-3B43	FECHA	TRMM-3B43	FECHA	TRMM-3B43
<b>2000</b>					
ene		may	3B43.20000501.7A.HDF	sep	3B43.20000901.7A.HDF
feb		jun	3B43.20000601.7A.HDF	oct	3B43.20001001.7A.HDF
mar	3B43.20000301.7A.HDF	jul	3B43.20000701.7A.HDF	nov	3B43.20001101.7A.HDF
abr	3B43.20000401.7A.HDF	ago	3B43.20000801.7A.HDF	dic	3B43.20001201.7A.HDF
<b>2001</b>					
ene	3B43.20010101.7A.HDF	may	3B43.20010501.7A.HDF	sep	3B43.20010901.7A.HDF
feb	3B43.20010201.7A.HDF	jun	3B43.20010601.7A.HDF	oct	3B43.20011001.7A.HDF
mar	3B43.20010301.7A.HDF	jul	3B43.20010701.7A.HDF	nov	3B43.20011101.7A.HDF
abr	3B43.20010401.7A.HDF	ago	3B43.20010801.7A.HDF	dic	3B43.20011201.7A.HDF
<b>2002</b>					
ene	3B43.20020101.7A.HDF	may	3B43.20020501.7A.HDF	sep	3B43.20020901.7A.HDF
feb	3B43.20020201.7A.HDF	jun	3B43.20020601.7A.HDF	oct	3B43.20021001.7A.HDF
mar	3B43.20020301.7A.HDF	jul	3B43.20020701.7A.HDF	nov	3B43.20021101.7A.HDF
abr	3B43.20020401.7A.HDF	ago	3B43.20020801.7A.HDF	dic	3B43.20021201.7A.HDF
<b>2003</b>					
ene	3B43.20030101.7A.HDF	may	3B43.20030501.7A.HDF	sep	3B43.20030901.7A.HDF
feb	3B43.20030201.7A.HDF	jun	3B43.20030601.7A.HDF	oct	3B43.20031001.7A.HDF
mar	3B43.20030301.7A.HDF	jul	3B43.20030701.7A.HDF	nov	3B43.20031101.7A.HDF
abr	3B43.20030401.7A.HDF	ago	3B43.20030801.7A.HDF	dic	3B43.20031201.7A.HDF
<b>2004</b>					
ene	3B43.20040101.7A.HDF	may	3B43.20040501.7A.HDF	sep	3B43.20040901.7A.HDF
feb	3B43.20040201.7A.HDF	jun	3B43.20040601.7A.HDF	oct	3B43.20041001.7A.HDF
mar	3B43.20040301.7A.HDF	jul	3B43.20040701.7A.HDF	nov	3B43.20041101.7A.HDF
abr	3B43.20040401.7A.HDF	ago	3B43.20040801.7A.HDF	dic	3B43.20041201.7A.HDF
<b>2005</b>					
ene	3B43.20050101.7A.HDF	may	3B43.20050501.7A.HDF	sep	3B43.20050901.7A.HDF
feb	3B43.20050201.7A.HDF	jun	3B43.20050601.7A.HDF	oct	3B43.20051001.7A.HDF
mar	3B43.20050301.7A.HDF	jul	3B43.20050701.7A.HDF	nov	3B43.20051101.7A.HDF
abr	3B43.20050401.7A.HDF	ago	3B43.20050801.7A.HDF	dic	3B43.20051201.7A.HDF
<b>2006</b>					
ene	3B43.20060101.7A.HDF	may	3B43.20060501.7A.HDF	sep	3B43.20060901.7A.HDF
feb	3B43.20060201.7A.HDF	jun	3B43.20060601.7A.HDF	oct	3B43.20061001.7A.HDF
mar	3B43.20060301.7A.HDF	jul	3B43.20060701.7A.HDF	nov	3B43.20061101.7A.HDF
abr	3B43.20060401.7A.HDF	ago	3B43.20060801.7A.HDF	dic	3B43.20061201.7A.HDF
<b>2007</b>					
ene	3B43.20070101.7A.HDF	may	3B43.20070501.7A.HDF	sep	3B43.20070901.7A.HDF
feb	3B43.20070201.7A.HDF	jun	3B43.20070601.7A.HDF	oct	3B43.20071001.7A.HDF
mar	3B43.20070301.7A.HDF	jul	3B43.20070701.7A.HDF	nov	3B43.20071101.7A.HDF
abr	3B43.20070401.7A.HDF	ago	3B43.20070801.7A.HDF	dic	3B43.20071201.7A.HDF
<b>2008</b>					
ene	3B43.20080101.7A.HDF	may	3B43.20080501.7A.HDF	sep	3B43.20080901.7A.HDF
feb	3B43.20080201.7A.HDF	jun	3B43.20080601.7A.HDF	oct	3B43.20081001.7A.HDF
mar	3B43.20080301.7A.HDF	jul	3B43.20080701.7A.HDF	nov	3B43.20081101.7A.HDF
abr	3B43.20080401.7A.HDF	ago	3B43.20080801.7A.HDF	dic	3B43.20081201.7A.HDF
<b>2009</b>					
ene	3B43.20090101.7A.HDF	may	3B43.20090501.7A.HDF	sep	3B43.20090901.7A.HDF
feb	3B43.20090201.7A.HDF	jun	3B43.20090601.7A.HDF	oct	3B43.20091001.7A.HDF
mar	3B43.20090301.7A.HDF	jul	3B43.20090701.7A.HDF	nov	3B43.20091101.7A.HDF
abr	3B43.20090401.7A.HDF	ago	3B43.20090801.7A.HDF	dic	3B43.20091201.7A.HDF
<b>2010</b>					
ene	3B43.20100101.7A.HDF	may	3B43.20100501.7A.HDF	sep	3B43.20100901.7A.HDF
feb	3B43.20100201.7A.HDF	jun	3B43.20100601.7A.HDF	oct	3B43.20101001.7A.HDF
mar	3B43.20100301.7A.HDF	jul	3B43.20100701.7A.HDF	nov	3B43.20101101.7A.HDF
abr	3B43.20100401.7A.HDF	ago	3B43.20100801.7A.HDF	dic	3B43.20101201.7A.HDF
<b>2011</b>					
ene	3B43.20110101.7A.HDF	may	3B43.20110501.7A.HDF	sep	3B43.20110901.7A.HDF
feb	3B43.20110201.7A.HDF	jun	3B43.20110601.7A.HDF	oct	3B43.20111001.7A.HDF
mar	3B43.20110301.7A.HDF	jul	3B43.20110701.7A.HDF	nov	3B43.20111101.7A.HDF
abr	3B43.20110401.7A.HDF	ago	3B43.20110801.7A.HDF	dic	3B43.20111201.7A.HDF

2012					
<b>ene</b>	3B43.20120101.7A.HDF	<b>may</b>	3B43.20120501.7A.HDF	<b>sep</b>	3B43.20120901.7A.HDF
<b>feb</b>	3B43.20120201.7A.HDF	<b>jun</b>	3B43.20120601.7A.HDF	<b>oct</b>	3B43.20121001.7A.HDF
<b>mar</b>	3B43.20120301.7A.HDF	<b>jul</b>	3B43.20120701.7A.HDF	<b>nov</b>	3B43.20121101.7A.HDF
<b>abr</b>	3B43.20120401.7A.HDF	<b>ago</b>	3B43.20120801.7A.HDF	<b>dic</b>	3B43.20121201.7A.HDF
2013					
<b>ene</b>	3B43.20130101.7A.HDF	<b>may</b>	3B43.20130501.7A.HDF	<b>sep</b>	3B43.20130901.7A.HDF
<b>feb</b>	3B43.20130201.7A.HDF	<b>jun</b>	3B43.20130601.7A.HDF	<b>oct</b>	3B43.20131001.7A.HDF
<b>mar</b>	3B43.20130301.7A.HDF	<b>jul</b>	3B43.20130701.7A.HDF	<b>nov</b>	3B43.20131101.7A.HDF
<b>abr</b>	3B43.20130401.7A.HDF	<b>ago</b>	3B43.20130801.7A.HDF	<b>dic</b>	3B43.20131201.7A.HDF

## ANEXO D

### D.1. Tratamiento a los datos de Precipitación del SENAMHI.

En el presente apartado se realiza una descripción del tratamiento a los datos de precipitación mensual proporcionados por el SENAMHI son un total de 201 estaciones meteorológicas para los departamentos de Piura, Lambayeque y Cajamarca del periodo de 1970 hasta 2013, para el cálculo del IPE de la serie histórica de cada estación meteorológica se realizó antes un tratamiento, **primero** se seleccionó las estaciones que cuentan con más del 80% de información de la data completa en toda la serie histórica, **segundo** se realizó los gráficos de la serie de tiempo y se eligió las que mostraron estacionalidad cada año (periodos húmedos y periodos secos) para cada estación meteorológica, **tercero** cada serie de las estaciones se correlaciono con la precipitación del TRMM 3B43 y se seleccionó las que presentan muy buena correlación ver (Tabla D.1.), **cuarto** se seleccionó 65 estaciones (Tabla 4.1.) que se usaron para el cálculo del IPE.

Zona de Aridez	Estación	Correlación	Zona de Aridez	Estación	Correlación
Hiperárida	BERNAL	0.5677	Subhúmeda Seca	SANTO DOMINGO	0.6312
	CHUSIS	0.5379		PUENTE CHUNCHUCA	0.5267
	LA ESPERANZA	0.5489		CONTUMAZA	0.6687
	MIRAFLORES	0.7823		LLAPA	0.647
	SAN MIGUEL	0.3676		NAMORA	0.7364
	CERRO DE ARENA	0.5222		SAN MARCOS	0.719
	LAMBAYEQUE	0.2383	Subhúmeda Húmeda	CHALACO	0.7005
	PIMENTEL	0.376		HACIENDA SHUMAYA	0.3145
Árida	LANCONES	0.6944		HUARMACA	0.5845
	MALLARES	0.6943		BAMBAMARCA	0.3894
	PANANGA	0.81		CHOTA	0.3781
	VIRREY	0.7128		HACIENDA NEGRITOS	0.4932
	BEBEDERO	0.3387		NAMBALLE	0.3767
	OYOTUN	0.3752		NIEPOS	0.3748
	PAÑALA	0.2486		PIMPINGOS	0.3718
	PASAJE SUR	0.7448		SAN JOSE DEL ALTO	0.3304
	TINAJONES	0.4358		TOCMOCHE	0.5331
	LAS PALTAS	0.4208		UDIMA	0.39
Semiárida	CHILETE	0.6417		CACHACHI	0.7494
	HACIENDA BIGOTE	0.6466		CAJABAMBA	0.7095
	HUANCABAMBA	0.5896		CHUGUR	0.6671
	MORROPON	0.6567		COSPAN	0.7385
	SAPILLICA	0.6112		QUILCATE	0.7065
	SAUSAL DE CULUCAN	0.6792		SAN JUAN	0.7572
	SONDORILLO	0.5856	Húmeda	AYABACA	0.7841
	VADO GRANDE	0.4045		TACALPO	0.344
	INCAHUASI	0.4624		CHONTALI	0.4666
	EL ARENAL	0.5591		HUALGAYOC	0.2851
	LAGUNA COMPUERTAS	0.3888		GRANJA PORCON	0.6694
	AUGUSTO WEBERBAUER	0.7477	<b>Tabla D.1.</b> Tabla de la correlación lineal de las estaciones meteorológica con las imágenes del TRMM del 2000 al 2013.		
	LIVES	0.6164			
	MAGDALENA	0.7681			
	SAN BENITO	0.6488			